



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação



Simulação de Regimes de Carga e Descarga em Baterias

NUNO MIGUEL COUTO PEREIRA
(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica – Ramo de Energia

Orientadores:

Doutor Victor Manuel Fernandes Mendes
Doutor Mário Rui Melício da Conceição

Júri:

Presidente: Doutor Luís Manuel dos Santos Redondo
Vogais: Doutor Victor Manuel Fernandes Mendes
Doutor Hugo Miguel Inácio Pousinho

Dezembro de 2016

Dissertação realizada em regime de coorientação pelos orientadores:

Doutor Victor Manuel Fernandes Mendes

Professor Coordenador com Agregação da Área Departamental
de Engenharia Eletrotécnica Energia Sistemas de Potência e Automação

Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

e

Doutor Mário Rui Melício da Conceição

Professor Auxiliar com Agregação

Departamento de Física

Escola de Ciências e Tecnologia

Universidade de Évora

Resumo

Esta dissertação trata a modelação e simulação de regimes de carga e de descarga em baterias utilizando parâmetros característicos. As dinâmicas de carga e descarga do modelo da bateria são validadas por simulações computacionais utilizando quatro tipos de baterias, sendo posteriormente efetuada uma análise comparativa entre os diferentes tipos. O modelo utiliza os parâmetros característicos das baterias fornecidas em tabelas pelos fabricantes.

Palavras-chave

Armazenamento de energia, baterias, carga, descarga, parâmetros característicos, SOC, tensão, corrente, modelação, simulação.

Simulation of Regimes of Charge/Discharge in Batteries

Abstract

This dissertation deals with the modeling and simulation of load regimes and discharge in batteries using characteristic parameters. The dynamic load charge and discharge of the battery model are validated by computer simulations using four types of batteries, and subsequently performed a comparative analysis of the different types. The model uses the characteristic parameters of batteries provided in tables by manufacturers.

Keywords

Energy storage, batteries, loading, discharge, characteristic parameters, SOC, voltage, current, modeling, simulation.

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Victor Manuel Fernandes Mendes, responsável como orientador científico, desejo expressar o meu agradecimento, pelos conselhos, linhas de orientação, conhecimentos transmitidos e pelo rigor que impôs no período em que decorreu o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Professor Doutor Mário Rui Melício da Conceição, responsável como orientador científico, desejo expressar o meu reconhecimento e agradecer pela sua total disponibilidade ao longo de todo o processo, por todas as horas que dedicou à orientação desta dissertação, pelos conselhos, pela elevada exigência e rigor que impôs e pelos conhecimentos transmitidos.

A todos os Professores da ADEEA do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, desejo expressar o meu agradecimento pelos conhecimentos transmitidos.

À minha família, desejo expressar o meu agradecimento pelo apoio e pela compreensão. Espero ser capaz de compensar os efeitos do distanciamento provocado por estar a realizar esta dissertação de mestrado.

A todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração desta dissertação de mestrado desejo expressar o meu agradecimento.

Índice

Palavras-chave	i
Keywords	iii
Agradecimentos	v
Índice.....	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Siglas	xv
Lista de Símbolos.....	xvii
CAPÍTULO 1	1
1 Introdução	3
1.1 Visão Histórica.....	3
1.2 Enquadramento.....	5
1.3 Motivação.....	6
1.4 Estado da Arte	7
1.5 Organização do Texto	11
CAPÍTULO 2.....	13
2 Bateria Recarregável.....	15
2.1 Bateria	15
2.1.1 Baterias de Chumbo- Ácido.....	16
2.1.2 Baterias de Níquel-Cádmio:.....	18
2.1.3 Baterias de Hidretos Metálicos de Níquel:	19
2.1.4 Baterias de Iões de Lítio:	20
2.2 Caraterísticas de uma Bateria.....	21
2.3 Constituição de uma bateria	24
2.3.1 Células.....	24

2.4	Perfis de Tensão e de Descarga.....	27
2.5	Efeito da Descarga na Taxa de Desempenho	28
2.6	Efeito da Temperatura.....	29
2.7	Taxa de Retenção ou auto-descarga.....	30
2.8	Vida Útil.....	31
2.9	Características de Carga.....	32
2.10	Custo.....	35
2.11	Normas	36
CAPÍTULO 3.....		41
3	Modelação de Carga e Descarga	43
3.1	Descarga	44
3.2	Carga	46
3.3	Sistema Simulado.....	49
CAPÍTULO 4.....		57
4	Simulação computacional.....	59
4.1	Simulação 1 – Bateria de Chumbo-ácido.....	64
4.1.1	Comportamento do SOC.....	64
4.1.2	Tensão na Bateria 1.....	66
4.1.3	Corrente na Bateria 1	67
4.1.4	Zona Exponencial	68
4.1.5	Características de Descarga	69
4.1.6	Comportamento da Tensão na Carga DC	70
4.1.7	Comportamento da corrente na Carga DC.....	71
4.1.8	Potência da Carga DC.....	72
4.2	Simulação 2 – Bateria de Iões de Lítio	73
4.2.1	Comportamento do SOC.....	73
4.2.2	Tensão na Bateria 1.....	74
4.2.3	Corrente na Bateria 1	75

4.2.4	Zona Exponencial	76
4.2.5	Características de Descarga	77
4.2.6	Comportamento da Tensão na Carga DC	78
4.2.7	Comportamento da corrente na Carga DC	79
4.2.8	Potência da Carga DC	80
4.3	Simulação 3 – Bateria de Níquel Cádmio	81
4.3.1	Comportamento do SOC	81
4.3.2	Tensão na Bateria 1	82
4.3.3	Corrente na Bateria 1	83
4.3.4	Zona Exponencial	84
4.3.5	Características de Descarga	85
4.3.6	Comportamento da Tensão na Carga DC	86
4.3.7	Comportamento da corrente na Carga DC	87
4.3.8	Potência da Carga DC	88
4.4	Simulação 4 – Bateria de Hidretos Metálicos de Níquel	89
4.4.1	Comportamento do SOC	89
4.4.2	Tensão na Bateria 1	90
4.4.3	Corrente na Bateria 1	91
4.4.4	Zona Exponencial	92
4.4.5	Características de Descarga	93
4.4.6	Comportamento da Tensão na Carga DC	94
4.4.7	Comportamento da corrente na Carga DC	95
4.4.8	Potência da Carga DC	96
4.5	Conclusões	97
	Referências Bibliográficas	101

Lista de Figuras

Figura 1.1- Pilha de Volta [1].....	4
Figura 2.1-Curva de descarga de uma bateria [41].	23
Figura 2.2- Exemplo de ligação série e paralelo em células[42].....	26
Figura 2.3-Perfis de descarga de sistemas de baterias secundárias convencionais [37].	27
Figura 2.4- Comparação de desempenho de sistemas de bateria secundária a 20 ° C [37].	28
Figura 2.5-Efeito da temperatura na energia específica de sistemas de baterias secundárias [37].	29
Figura 2.6-Capacidade de Retenção de sistemas de baterias secundárias [37].	31
Figura 2.7-Efeito da profundidade de descarga no ciclo de vida de sistemas de baterias secundárias [37].	32
Figura 2.8- Características de carga típicas de sistemas de baterias secundárias, a corrente constante de carga a 20 ° C [37].	33
Figura 2.9-Características de uma bateria de Li-íon a 20 ° C [37].....	34
Figura 3.1-Circuito equivalente de carga e descarga da bateria [45].	43
Figura 3.2-Configuração do sistema simulado.....	49
Figura 3.3-Subsistema da Bateria 1[44].	50
Figura 3.4-Função de descarga em <i>MatLab/Simulink</i> da bateria 1.	50
Figura 3.5-Bloco que permite selecionar o tipo de bateria[44].	51
Figura 3.6-Bloco resistência interna da bateria[44].	51
Figura 3.7 e Figura 3.8 -Parâmetros de ajuste bateria 1[44].	52
Figura 3.9-Parâmetros bateria 1[44].	54
Figura 3.10-Bloco “Breaker Bateria”.	55
Figura 3.11- Bloco “Breaker Carga”.	55
Figura 3.12- Bloco “Alimentação Bateria 1”.	55
Figura 3.13- Bloco “Carga DC”.	56
Figura 3.14- Bloco “Limitador de Carga/Descarga”.	56
Figura 4.1-Comportamento do SOC em função do tempo.....	65

Figura 4.2-Tensão na Bateria 1.	66
Figura 4.3-Corrente na Bateria 1.	67
Figura 4.4-Histerese.....	68
Figura 4.5-Curva de Descarga típica.	69
Figura 4.6-Curva de descarga à corrente nominal.....	69
Figura 4.7-Comportamento da tensão na carga DC.	70
Figura 4.8-Corrente na Carga DC.	71
Figura 4.9-Potência na Carga DC.....	72
Figura 4.10-Comportamento do SOC.....	73
Figura 4.11-Tensão na Bateria 1.	74
Figura 4.12-Corrente na Bateria 1.	75
Figura 4.13- Histerese.....	76
Figura 4.14-Curva de descarga à corrente nominal.....	77
Figura 4.15-Tensão na Carga DC.	78
Figura 4.16-Corrente na carga DC.	79
Figura 4.17-Potência na Carga DC.....	80
Figura 4.18-Comportamento do SOC.....	81
Figura 4.19-Tensão na Bateria 1.	82
Figura 4.20-Corrente na Bateria 1.	83
Figura 4.21-Histerese.....	84
Figura 4.22-Curva de descarga à corrente nominal.....	85
Figura 4.23- Comportamento da tensão na carga DC.	86
Figura 4.24-Corrente na carga DC.	87
Figura 4.25-Potência na carga DC.....	88
Figura 4.26-Comportamento do SOC.....	89
Figura 4.27-Comportamento da tensão bateria 1.	90
Figura 4.28-Corrente na Bateria 1.	91
Figura 4.29-Histerese.....	92
Figura 4.30-Curva de descarga à corrente nominal.....	93
Figura 4.31-Tensão na Carga DC.	94
Figura 4.32-Corrente na Carga DC.	95
Figura 4.33-Potência na Carga DC.....	96

Lista de Tabelas

Tabela 2.1-Vantagens e desvantagens das baterias de Chumbo-Ácido [40].....	18
Tabela 2.2-Vantagens e desvantagens das baterias de NiCd [40]	19
Tabela 2.3-Vantagens e desvantagens das baterias de NiMH [40]	20
Tabela 2.4- Vantagens e desvantagens das baterias de Li-íon[40].....	21
Tabela 2.5-Tensão das células para os diferentes tipos de baterias [1]	25
Tabela 2.6- Caraterísticas das tecnologias de baterias mais comuns [40].....	35
Tabela 2.7-Normas Internacionais para Baterias [43].....	36
Tabela 4.1- Parâmetros principais da bateria de chumbo-ácido.....	60
Tabela 4.2-Parâmetros principais da bateria de iões de lítio	61
Tabela 4.3-Parâmetros principais da bateria de níquel cádmio.....	62
Tabela 4.4-Parâmetros principais da bateria de hidretos metálicos de níquel	63
Tabela 4.5-Parâmetros da <i>carga DC</i> , da <i>fonte de tensão</i> e <i>breaker da bateria 1</i>	64
Tabela 4.6-Comparação de Resultados.	98

Lista de Siglas

AGM	Bateria de tecnologia de Chumbo-ácido com separador de microfibras de vidro
BS EN	<i>British Standard European Norm</i>
DC	<i>Direct current</i>
DOD	<i>Depth of discharge</i>
EN	<i>European Standards</i>
EOC	<i>The end of charge</i>
FER	Fontes de energia renovável
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
Li-íon	Tecnologia da bateria de Iões de lítio
NiCd	Tecnologia da bateria de Níquel cádmio
NiMH	Tecnologia da bateria de Hidreto metálico de níquel
OCV	<i>Open-circuit voltage</i>
SAE	Sistemas de armazenamento de energia
SOC	<i>State of Charge</i>
VLA	Baterias de tecnologia de Chumbo-ácido ventiladas ou abertas
VLRA	Baterias de tecnologia de Chumbo-ácido estanques ou reguladas por válvulas
VRFB	Tecnologia da bateria de Fluxo de óxido de vanádio

Lista de Símbolos

A	Ampere (corrente)
Ah	Ampere.hora (capacidade)
B	Capacidade Exponencial
°C	Grau celsius
E	Energia
Exp	Zona exponencial
g	grama
h	hora (tempo)
i	Corrente
i*	Dinâmica de corrente de baixa frequência
it	Capacidade extraída
K ₁	Resistência de Polarização
K ₂	Constante de polarização
k	Quilo (prefixo)
m	mili (prefixo)
min	minutos (tempo)
P	Potência
Q	Capacidade máxima da bateria
s	segundo (tempo)
Sel	Modo da bateria
t	tempo
U	Tensão

V	Volt
%	por cento (percentagem)
Ω	Ohm
\$	US Dólar (moeda americana)
W	Watt (potência)
Wh	Watt.hora (energia)

CAPÍTULO

1

Introdução

Neste capítulo são apresentados a visão histórica do tema da dissertação, o enquadramento, a motivação para o estudo, o estado da arte e a organização do texto.

1 Introdução

Neste capítulo são apresentados a visão histórica do tema da dissertação, o enquadramento, a motivação do estudo, o estado da arte e a organização do texto.

1.1 Visão Histórica

As Baterias já existem há cerca de 200 anos [1]. Desde o seu início, que os investigadores têm tentado melhorar a densidade de energia armazenada e a construção de um invólucro para a bateria mais conveniente para o utilizador. Esta investigação continua nos dias hoje, aumentando as oportunidades de mercado quanto mais significativo for o nível de melhoria no desempenho da bateria [1].

Os historiadores datam a invenção da bateria, com a pilha de Volta em 1800, quando Alessandro Volta fez testes dos quais resultaram na conversão de energia para a forma de energia elétrica decorrente de reações químicas entre metais diferentes. A pilha de Volta original, na qual foram utilizados discos de zinco, prata e um separador que consiste num material poroso não condutor saturado com água do mar. Quando empilhadas pode ser medida uma tensão entre o disco de zinco e o disco de prata respetivamente. Na Figura 1.1 é apresentada a pilha de Volta [1].

Johann Ritter demonstrou pela primeira vez a bateria recarregável em 1802. No entanto, as baterias recarregáveis permaneceram como curiosidade laboratorial até ao desenvolvimento, muito mais tarde no século XIX, de geradores para carregamento das baterias. Durante os 60 anos seguintes foram continuadas as experiências com diferentes combinações de metais e eletrólitos[1].

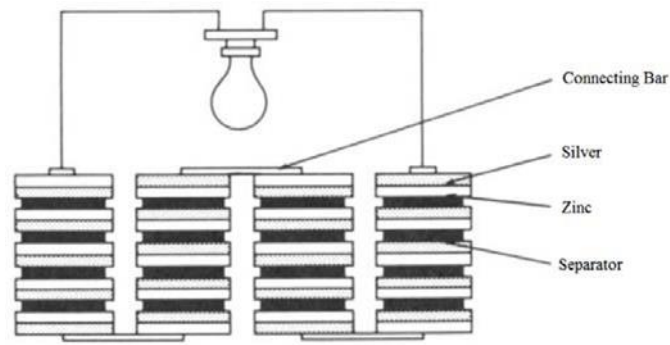


Figura 1.1- Pilha de Volta [1].

O interesse em melhoramentos nas tecnologias existentes e novos desenvolvimentos continuam a ser a aposta nos dias de hoje [1]. A procura por fontes de armazenamento de energia versáteis, limpas, com alta densidade de energia têm vindo a crescer. Até à data, os resultados da indústria da tecnologia das baterias tem apresentado grande desenvolvimento, sendo mais evidente as melhorias em tipos de baterias usuais [1]. No entanto, três novos tipos de bateria, que usam diferentes materiais e tecnologias, estão a começar a ser aplicadas. As baterias de lítio estão em crescente aplicação, sendo usadas em situações que requerem um fornecimento de energia baixo mas por um longo período de tempo.

Um ciclo de vida longo, combinado com uma alta densidade de energia tem sido o objetivo no desenvolvimento da bateria de Níquel-Hidrogénio, que se concentrou em aplicações para naves espaciais. Apesar da complexidade da tecnologia da bateria de Níquel-Hidrogénio e do custo, o alto desempenho acaba por ser uma das maiores vantagens desta tecnologia. As baterias de Níquel-Hidrogénio são concorrentes diretas das baterias de Níquel Cádmio (NiCd) [1]. A tecnologia que está atualmente com maior aplicação em produtos comerciais i.e., câmaras fotográficas, comandos para controlo de aparelhos eletrónicos, máquinas de barbear, é um híbrido de duas tecnologias, o Níquel-Hidrogénio e o Níquel Cádmio chamado de tecnologia de baterias de Hidretos Metálicos de Níquel (NiMH) [1].

Em [2] são utilizadas baterias em equipamentos de significativos valores de potência nomeadamente em edifícios e em sistemas eólicos para situações de fornecimento de energia à rede em caso de *blackout* na rede.

1.2 Enquadramento

A energia é um elemento fundamental para a sociedade e componente crítico na economia global moderna. Hoje cerca de 87 % da energia global é fornecida através de três fontes primárias que incluem o petróleo, o carvão e o gás natural [3]. As fontes primárias têm uma vida útil limitada e estão apenas disponíveis em determinadas regiões do globo. De acordo com estudos estatísticos recentes, as reservas mundiais de petróleo, carvão, e gás só têm uma vida útil de 112 anos, 63,6 anos e 54,2 anos respetivamente [4], [5]. Nos tempos que correm, cerca de 1,3 mil milhões de pessoas no mundo ainda não têm acesso à eletricidade e mais de 2,6 mil milhões dependem da biomassa tradicional para cozinhar e para o aquecimento [6]. Até 2040 é previsto um aumento do consumo global de energia em mais de 56 % [7].

Ao contrário das centrais elétricas alimentadas por combustíveis fósseis, as tecnologias que utilizam energias renováveis são consideradas mais sustentáveis e amigas do ambiente [8]. Algumas destas fontes, especialmente eólica e solar fotovoltaica, estão a ter um crescimento rápido e são cada vez mais competitivas quando comparadas com as tecnologias convencionais de produção de energia elétrica [9], [10].

1.3 Motivação

A sociedade é imensamente dependente de energia e o desenvolvimento económico mundial está diretamente ligado ao uso da energia. Pelo que, é fato que se tem verificado uma crescente procura de energia como forma de permitir que a sociedade atinja um desenvolvimento que permita maior qualidade de vida. As fontes renováveis de energia têm um amplo papel na satisfação destas necessidades, uma vez que as fontes tradicionais de energia são, em norma, altamente poluentes e até no que diz respeito a centrais nucleares, perigosas. Deste modo, de ano para ano, existe uma preocupação cada vez maior da redução da poluição e emissão de gases de efeito estufa e, consequentemente, uma procura alternativa às fontes de produção tradicionais [8].

As fontes solar fotovoltaica e a eólica são cada vez mais fontes principais que constituem alternativas às fontes tradicionais, por exemplo, carvão, gás natural, em geral combustíveis de origem fóssil. Contudo, devido à natureza das fontes solar fotovoltaica e eólica que dependem de condições não controláveis, i.e., condições climáticas e meteorológicas. No caso da fonte solar variabilidade e intermitência da radiação solar; no caso da eólica a variabilidade e intermitência da velocidade do vento. Pelo que, o uso destas fontes origina que a produção seja imprevisível. A solução para ultrapassar esta imprevisibilidade passa pela utilização de sistemas de armazenamento de energia elétrica, SAE, que no caso particular desta dissertação, são as baterias Li-íon, NiCd, NiMH e Chumbo-Ácido. Sistema de armazenamento de energia elétrica é um dispositivo capaz de armazenar energia elétrica permitindo a sua utilização num momento posterior. A implementação de um SAE numa fonte renovável, permite, portanto, aumentar a previsibilidade da produção, pois, armazena o excedente de energia num determinado período e descarrega-o num momento posterior, em que haja escassez de energia[11][12].

Isso pode aumentar a percentagem da eletricidade produzida a partir de um máximo de autoconsumo de 30% sem armazenamento para cerca de 70%, otimizando a eficiência e reduzindo a quantidade de potência necessária a partir da rede [13].

1.4 Estado da Arte

Em [14] é feita um estudo da eficiência das baterias de NiMH, durante o seu processo de carga e descarga, sendo o processo feito com taxas de carga e descarga diferentes. Este estudo é particularmente interessante para se conseguir determinar o nível de estado de carga necessário para a utilização em aplicações de armazenamento de energia.

Em [15] é estudado um modelo de degradação dinâmica da capacidade da bateria de íões de lítio (Li-íon) de grande capacidade em diferentes condições de trabalho. São efetuadas simulações em Matlab para comprovar a validade do modelo.

Em [16] é desenvolvido um modelo matemático exponencial de previsão da vida útil das bateria de Li-íon. Este modelo é mais preciso que os modelos usados para comparação.

Em [17] é feita uma análise da utilização das baterias de Li-íon na rede elétrica para uniformizar o diagrama de carga e o excesso de procura. Recorre a um algoritmo que permite a gestão da bateria, regulando a potência ativa e reativa de acordo com o consumo.

Em [18] é feita uma análise de viabilidade técnica dos sistemas de armazenamento com base em baterias de íões de lítio para dar resposta em redes com elevados níveis de incidência eólica.

Em [19] é analisado um método de identificação de perdas e falhas nas baterias de chumbo-ácido utilizadas em sistemas fotovoltaicos PV, sendo baseado numa estimativa da radiação solar. A deteção de perdas e falhas da bateria garante a eficiência do sistema PV.

Em [20] é estudado uma metodologia de otimização para avaliar a duração da vida útil das baterias de Chumbo-ácido. Foram estudadas todos os componentes de um sistema

fotovoltaico. Um dos componentes importantes que tem influência na duração de uma bateria de Chumbo-ácido é o controlador de carga.

Em [21] é feita uma análise ao desenvolvimento das baterias de fluxo de óxido de vanádio (VRFB) através da caracterização dos componentes constituintes, processos de carga e descarga da VRFB, custos associados a uma VRFB de 2kW/30kW, e descrição de incentivos que permitam uma maior adesão a esta tecnologia.

Em [22] é feita uma validação através de um dos métodos, nomeadamente do contador de coulomb para estimar o estado de carga (SOC) de uma bateria de gel de chumbo-ácido. O método foi verificado numa bateria através dos ciclos de carga, e descarga em condições de funcionamento real.

Em [23] é estudado um modelo de bateria VRFB no sentido da sua integração num parque eólico com a potência de 10 MW em ambiente de mercado. O modelo combina uma unidade VRFB, que permite compensar os desvios de energia resultantes da previsão. Foi afirmado que as baterias de VRFB têm um dimensionamento simples quando comparado com outras tecnologias dado a sua capacidade de armazenamento de energia depender da capacidade dos tanques com eletrólito.

Em [24] é feita uma análise aos sistemas de armazenamento de energia, com enfoque nas VRFB através de uma modelização baseada no método dos elementos finitos com intuito de determinar o fluxo de potência, tensão do eletrólito, e as concentrações de vanádio ao longo de um período de 24 horas.

Em [25] é feita uma análise ao progresso e desenvolvimento das baterias de VRFB. Sendo apresentada uma visão das aplicações deste tipo de baterias, tanto ao nível de

caraterísticas técnicas bem como dos custos associados. Sendo aconselhado a utilização em aplicações que requerem mais de 4 horas de armazenamento de energia.

Em [26] é feita uma análise a diferentes métodos para monitorização do estado de carga das VRFB. Durante o carregamento podem surgir problemas no controlo do

desequilíbrio eletroquímico entre os dois eletrólitos de meia-célula que surgem como resultado da transferência diferencial de íons através da membrana e as reações secundárias.

Em [27] é feito um estudo ao eletrólito, de uma bateria VRFB, com o intuito de expandir o uso das baterias VRFB a aplicações móveis, visto o espaço ocupado pelos tanques de armazenamento de vanádio ser grande. A partir da avaliação global das experiências de super saturação, densidade, viscosidade e medições de condutividade. Com o aumento da concentração de vanádio a 3M permitirá um aumento de 50% na densidade de energia em comparação com as soluções de 2M utilizadas até ao momento.

Em [28] é apresentado um estudo sobre o desenvolvimento das baterias VRFB desde o seu aparecimento nos USA, até ao desenvolvimento industrial, nomeadamente pela indústria Japonesa.

Em [29] é feito um estudo aos diferentes tipos de baterias de VRFB. As VRFB conseguem uma eficiência energética de até 80%, tendo este tipo de armazenamento um enorme potencial para aplicação em grandes valores de potência. Em termos de eficiência energética entre outros parâmetros analisados, as baterias VRFB são consideravelmente superiores às restantes analisadas.

Em [30] é feito um estudo ao desenvolvimento e expansão da energia produzida por fontes renováveis a nível mundial, sendo demonstrado paralelamente o interesse no armazenamento de energia em baterias para se conseguir uma otimização na utilização da energia em diversas aplicações.

Em [31] é estudado um modelo de otimização de custos de produção de energia elétrica com armazenamento para um sistema híbrido não ligado à rede elétrica, comparando os impactos de diferentes tecnologias de baterias. Foi tido em conta a duração de três tipos de baterias num prazo de 20 anos. Para o estudo entraram como variáveis, o tipo de bateria, o estado de carga durante um ciclo, número de substituições da bateria e taxa de desconto aplicada.

Em [32] é estudado um modelo de simulação de VRFB, que tem como principal vantagem o tempo de simulação reduzido, a não dependência de parâmetros de difícil obtenção a partir das tabelas de características técnicas dos fabricantes, e já entra com as perdas de coulomb.

Em [33] é feita uma análise à bateria de VRFB, através de uma simulação na qual entram aspectos como as reações eletroquímicas, perdas nas bombas de circulação do eletrólito, mudanças de temperatura no interior da VRFB e envelhecimento dos materiais.

Em [34] é feita uma análise aos parâmetros eletroquímicos e térmicos de uma VRFB através de simulação e comparado com um caso prático. Os resultados apresentam um desempenho adequado.

Em [35] é feito um estudo às VRFB, analisando alguns dos seus interesses em futuras aplicações bem como as limitações de construção, que têm vindo a ser ultrapassadas com os anos, facilitando a expansão deste tipo de tecnologia de armazenamento de energia no mercado.

Em [36] é analisado o estado da arte para a carga/descarga de sistemas de energia elétrica nomeadamente da bateria de fluxo de óxido de vanádio ligada à rede elétrica. Esta bateria quando comparada com outras baterias de fluxo de óxido de vanádio apresenta o valor mais alto de tensão na célula, implicando uma maior potência e densidade de energia que privilegia a aplicação em centrais produtoras de energia elétrica.

1.5 Organização do Texto

Esta dissertação está dividida em quatro capítulos.

Seguidamente é apresentado uma descrição mais detalhada do conteúdo de cada capítulo.

Capítulo 1. Introdução

No capítulo são apresentados a visão histórica do tema da dissertação, o enquadramento, a motivação do estudo, o estado da arte e a organização do texto.

Capítulo 2. Bateria Recarregável

No capítulo é apresentada uma visão sobre a bateria recarregável, nomeadamente os tipos e características das baterias secundárias em estudo, conceitos gerais da bateria, perfis de tensão e descarga, efeito de descarga na taxa de desempenho, o efeito da temperatura, taxa de retenção, vida, características de descarga, custo e as normas aplicáveis mais comuns em a aplicações das baterias e algumas das organizações que as emitem e ou efetuam a garantia de qualidade e de testes de conformidade.

Capítulo 3. Modelação do Sistema de Carga e Descarga

No capítulo é apresentada a modelação de um sistema de carga e descarga de baterias sujeito a condições características. O sistema de carga e descarga é constituído por uma bateria, associado a uma sistema de regulação do estado de carga da bateria, uma carga DC, e uma fonte de tensão.

Capítulo 4. Simulação Computacional

Neste capítulo são apresentados os casos de estudo e os resultados obtidos, recorrendo a simulações computacionais, sobre o desempenho do sistema de carga e descarga de baterias, cuja modelação foi feita no capítulo anterior.

CAPÍTULO

2

Bateria Recarregável

No capítulo é apresentada uma visão sobre as baterias recarregáveis, nomeadamente os tipos; características das baterias em estudo; perfis de tensão e de descarga; efeito de descarga na taxa de desempenho; efeito da temperatura; taxa de retenção; vida útil; características de carga; custo; normas aplicáveis; organizações que emitem as normas e ou avaliam a garantia de qualidade e de testes de conformidade.

2 Bateria Recarregável

No capítulo é apresentada uma visão sobre as baterias recarregáveis, nomeadamente os tipos; características das baterias em estudo; perfis de tensão e descarga; efeito de descarga na taxa de desempenho; efeito da temperatura; taxa de retenção; vida útil; características de carga; custo; normas aplicáveis; organizações que emitem as normas e ou avaliam a garantia de qualidade e de testes de conformidade.

2.1 Bateria

Os dispositivos elétricos e eletrónicos, são cada vez mais partes essenciais da sociedade atual. As baterias são dos poucos métodos práticos de armazenamento de energia. Como tal, são componentes vitais em dispositivos eletrónicos e elétricos desde as máquinas de barbear portáteis a equipamentos de significativos valores de potência, nomeadamente em edifícios e em sistemas eólicos ou fotovoltaicos. Os recentes avanços na tecnologia das baterias, têm proporcionado um aumento significativo do seu uso em dispositivos elétricos. As aplicações de baterias estão mais diversificadas, sendo especialmente importante que o utilizador final comece a compreender melhor os fundamentos teóricos que esclarecem sobre o funcionamento de uma bateria [37]. Uma bateria recarregável é um grupo de uma ou mais células eletroquímicas, designadas de células secundárias visto as reações eletroquímicas serem eletricamente reversíveis. As baterias recarregáveis podem ter diferentes formas e tamanhos, como desde um botão a sistemas conectados para estabilização da tensão na rede elétrica de distribuição. Combinações diferentes de elementos químicos são comumente usadas nos electrólitos, incluindo: Chumbo-ácido, níquel cádmio (NiCd), hidreto metálico de níquel (NiMH), iões de lítio (Li-íon) [38].

As características importantes das baterias recarregáveis são nomeadamente as de que a transformação de energia química em energia elétrica é feita quase de forma reversível, ser eficiente energeticamente, de ter o mínimo de mudanças físicas que possam vir a limitar os ciclos de vida [37]. A reacção química pode eventualmente

causar deterioração dos componentes da bateria e consequentemente perda de ciclos de vida, deve ter características que permitam alcançar um comportamento aceitável, i.e, alta energia específica, baixa resistência e bom desempenho ao longo de uma ampla banda de temperaturas de funcionamento. Estes requisitos limitam o número de materiais que podem ser utilizados com sucesso numa bateria recarregável [37]. As variedades de baterias recarregáveis mais usuais são: Chumbo-ácido, Li-íon, NiCd e NiMH.

2.1.1 Baterias de Chumbo- Ácido

As baterias de chumbo-ácido são as mais utilizadas em sistemas nomeadamente fotovoltaicos devido ao seu baixo custo e desempenho eficiente. Nestas baterias os elétrodos são constituídos por placas de chumbo imersos num eletrólito ácido, tipicamente o ácido sulfúrico [39].

O processo de carga das baterias de chumbo-ácido deve ser efetuado com correntes elétricas baixas, o que conduz a um tempo de carga elevado. Durante o processo de carga deve ser evitada a ocorrência de sobrecargas, para mitigar a sua sensibilidade às sobrecargas de corrente. As baterias de chumbo-ácido não devem ser descarregadas totalmente uma vez que uma descarga total pode impossibilitar a recarga da bateria, ou pelo menos, diminuir a capacidade de carga [39]. Estas baterias são sensíveis a variações da temperatura de funcionamento, i.e., as altas temperaturas aumentam a capacidade mas diminuem o tempo de vida útil e baixas temperaturas diminuem a sua capacidade [39].

Existem dois grandes tipos de baterias de chumbo-ácido:

- As baterias ventiladas ou abertas (VLA):

Nas baterias VLA o eletrólito está sob a forma de uma solução aquosa sendo necessário o seu funcionamento numa posição vertical para evitar o derrame do eletrólito. Estas baterias necessitam de manutenção, nomeadamente a reposição periódica do nível de

água uma vez que durante o funcionamento da bateria, principalmente em condições de sobrecarga, se dá a eletrólise da água que faz com que o oxigénio e o hidrogénio sejam libertados sob o estado gasoso [39].

- As baterias estanques ou reguladas por válvulas (VLRA):

As baterias VLRA são seladas possuindo, no entanto, válvulas que permitem a saída de gases quando a pressão no interior da bateria atinge níveis perigosos. De uma maneira geral as baterias VLRA apresentam, face às VLA, a vantagem de permitirem a recombinação dos gases, reduzindo as perdas de água, o que faz com que necessitem de menor manutenção [39].

Dentro deste tipo de baterias são distinguidas duas tecnologias diferentes:

Baterias com separador de microfibras de vidro, conhecidas por baterias de AGM. Este separador absorve o eletrólito o que evita que este se desloque livremente no interior da bateria.

Baterias de gel em que o eletrólito se encontra misturado com sílica, conferindo a consistência de um gel, mantendo o eletrólito imóvel no interior da bateria [39].

As vantagens e desvantagens das baterias de Chumbo-Ácido são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1-Vantagens e desvantagens das baterias de Chumbo-Ácido [40]

Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo e simples de fabricar, em termos de custo por densidade de energia, a bateria de VLRA é a menos cara.
	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologia madura e confiável , quando usada corretamente, a bateria de VLRA é durável e fornece um serviço confiável.
	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa taxa de auto-descarga, esta bateria está entre as mais baixas das baterias recarregáveis.
	<ul style="list-style-type: none"> • Permite taxas elevadas de descarga.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Não podem ser armazenadas quando descarregadas.
	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa densidade de energia
	<ul style="list-style-type: none"> • Permite um número limitado de ciclos de descarga completos, adequado para aplicações que exigem descargas profundas ocasionais.
	<ul style="list-style-type: none"> • Prejudicial ao meio ambiente, o eletrólito e o teor de chumbo pode causar danos ambientais significativos.
	<ul style="list-style-type: none"> • Restrições de transporte, existem preocupações ambientais sobre o derrame do eletrólito em caso de acidente.

2.1.2 Baterias de Níquel-Cádmio:

As baterias de níquel-cádmio (NiCd) são constituídas por um ânodo de hidróxido de níquel, um cátodo de cádmio e um eletrólito alcalino, tipicamente hidróxido de potássio [9]. As reações de oxidação-redução são dadas apenas entre os elétrodos, o que anula a ocorrência de sulfatação. As baterias de NiCd têm um preço inicial mais elevado que as de chumbo-ácido mas são mais resistentes a variações de temperatura e a condições de sobrecarga. Tem a vantagem de aceitar correntes elevadas durante a carga conduzindo a um menor tempo de carga. Para além do seu preço inicial elevado a principal desvantagem das baterias NiCd reside na existência de efeito de memória que obriga a descarregar totalmente a bateria para que não dê lugar à viciação (diminuição da tensão fornecida pela bateria) [9].

As vantagens e desvantagens das baterias de NiCd são apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2-Vantagens e desvantagens das baterias de NiCd [40]

Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Elevado número de ciclos de carga ou descarga, se mantida corretamente fornece mais de 1000 ciclos de carga ou descarga.
	<ul style="list-style-type: none"> • Bom desempenho de carga. Permite recarregar a baixas temperaturas.
	<ul style="list-style-type: none"> • Prazo de validade longo - em qualquer estado de carga.
	<ul style="list-style-type: none"> • Armazenamento simples e transporte, a maioria das empresas de transporte aéreo aceitam transportar as baterias sem condições especiais.
	<ul style="list-style-type: none"> • Bom desempenho a baixa temperatura.
	<ul style="list-style-type: none"> • Preço económico, é a bateria de menor custo em termos de custo por ciclo.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Disponível em uma ampla gama de tamanhos e opções de desempenho, a maioria das células são cilíndricas.
	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa densidade de energia, em comparação com os sistemas mais recentes.
	<ul style="list-style-type: none"> • Efeito de memória, deve ser periodicamente carregado para evitar os efeitos de memória.
	<ul style="list-style-type: none"> • Prejudiciais ao meio ambiente, contém metais tóxicos. Alguns países estão a limitar o uso desta bateria.
	<ul style="list-style-type: none"> • Tem elevada taxa de auto-descarga, precisa de ser recarregada após o armazenamento.

2.1.3 Baterias de Hidretos Metálicos de Níquel:

As baterias de hidretos metálicos de níquel (NiMH) têm uma constituição semelhante às das baterias de NiCd. A diferença introduzida relativamente às baterias NiCd reside na alteração dos materiais que constituem o cátodo, uma liga de elementos metálicos, que anula o indesejável efeito de memória

As vantagens e desvantagens das baterias de NiMH são apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3-Vantagens e desvantagens das baterias de NiMH [40]

Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • 30% a 40% maior capacidade do que na bateria de NiCd padrão. A bateria de NiMH tem potencial para densidades de energia ainda mais elevadas.
	<ul style="list-style-type: none"> • Menor tendência para o efeito de memória quando comparado com a bateria de NiCd, sendo necessário menor frequência de ciclos periódicos de carga ou descarga.
	<ul style="list-style-type: none"> • Armazenamento e transporte simples, as condições de transporte não estão sujeitas a controlo regulamentar.
	<ul style="list-style-type: none"> • Sustentáveis ambientalmente, não contêm agentes tóxicos perigosos; rentável para reciclagem.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Com vida útil limitada, se forem repetidos ciclos profundos, especialmente em correntes de carga elevada, o desempenho começa a ser reduzido após 200 a 300 ciclos. São preferíveis ciclos baixos de descarga.
	<ul style="list-style-type: none"> • Corrente de descarga limitada, embora seja capaz de fornecer correntes de descarga altas, repetidas descargas reduzem o ciclo de vida da bateria.
	<ul style="list-style-type: none"> • Alta auto-descarga, têm cerca de 50% maior taxa de auto-descarga quando comparadas com as de NiCd. Novos elementos químicos melhoram a taxa de auto-descarga, com a contrapartida da diminuição da densidade de energia.
	<ul style="list-style-type: none"> • O desempenho é deteriorado quando armazenada a temperaturas elevadas, devem ser armazenadas em locais frescos com um estado de carga de cerca de 40%.
	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo de manutenção, a bateria requer descargas completas regulares para evitar a formação cristalina.
	<ul style="list-style-type: none"> • É cerca de 20 % mais cara do que as baterias de NiCd. As baterias de NiMH projetadas para alto consumo de corrente são mais caras do que a versão regular.

2.1.4 Baterias de Iões de Lítio:

As baterias de iões de lítio (Li-íon), são constituídas por um cátodo de lítio, um ânodo de carbono poroso e um eletrólito composto por sais de lítio num solvente orgânico i.e., solução não aquosa [9]. Estas baterias são leves e têm um tempo de vida útil elevado. Podem ser carregadas com correntes altas, tal como as NiCd, e suportam uma vasta

amplitude de temperaturas de funcionamento. As principais desvantagens deste tipo de baterias residem na sua baixa eficiência e no preço elevado.

As vantagens e desvantagens das baterias de Li-íon são apresentadas na Tabela 2.4

Tabela 2.4- Vantagens e desvantagens das baterias de Li-íon[40]

Vantagens	<ul style="list-style-type: none">• Alta densidade de energia.
	<ul style="list-style-type: none">• Baixa taxa de auto-descarga. A taxa de auto-descarga é cerca de metade quando comparado com a bateria de NiCd.
	<ul style="list-style-type: none">• Baixa manutenção, não é necessário efetuar descargas periódicas; não tem efeito de memória.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none">• Requer um circuito de proteção que limita a tensão e a corrente.
	<ul style="list-style-type: none">• Sujeito a envelhecimento, mesmo que não se encontre em utilização. O efeito de envelhecimento pode ser reduzido se o armazenamento da bateria for feito num lugar fresco e com um estado de carga de 40%.
	<ul style="list-style-type: none">• Corrente de descarga moderada.
	<ul style="list-style-type: none">• Sujeito a regulamentações de transporte. Esta restrição não se aplica a baterias de uso pessoal.
	<ul style="list-style-type: none">• Custo elevado na fabricação. Têm um custo 40% superior quando comparadas com as baterias de NiCd. Melhores técnicas de fabrico e substituição de metais raros com alternativas de menor custo, irão reduzir o seu preço.

2.2 Caraterísticas de uma Bateria

A eletroquímica da bateria é frequentemente o foco de discussão do desempenho da bateria, no entanto também os materiais do elétrodo desempenham um papel fundamental na determinação das características de desempenho. A taxa à qual a energia flui é modelada por fatores práticos associados à construção da bateria bem como a

seleção de outros materiais utilizados na sua construção, incluindo o tipo e quantidade de eletrólito [41].

Para análise ao funcionamento de uma bateria é necessário ter presente, alguns conceitos elétricos característicos, tais como:

- **Tensão e Corrente**

O potencial eletroquímico, ou tensão, é a quantidade de trabalho ou de energia que pode ser realizado por uma unidade de carga elétrica [41].

A corrente elétrica é o fluxo “ordenado” de partículas portadoras de carga elétrica, ou também, o deslocamento de cargas dentro de um condutor, quando existe uma diferença de potencial elétrico entre as extremidades [41].

- **Resistência**

É a capacidade de um corpo qualquer se opor à passagem da corrente elétrica mesmo quando existe uma diferença de potencial aplicada. De acordo com a lei de Ohm, a diferença de tensão entre o dois pontos é diretamente proporcional à corrente entre esses dois pontos num meio condutor e inversamente proporcional à resistência do condutor:

$$V = R \cdot I \tag{2.1}$$

Onde, I é a corrente (A), V é a diferença de tensão (V), e R representa a resistência (Ω). A unidade de resistência é o ohm. A unidade pode ser escrita como ohm ou Ω . [41].

- **Capacidade**

A quantidade de energia fornecida por uma bateria é a sua capacidade e é medido em unidades de amperes-hora ou ampere-hora (Ah). Quantifica quanto tempo uma bateria

vai durar em horas com uma corrente de descarga em amperes. É um cálculo que se faz quando a bateria descarrega a uma corrente constante [41].

$$Capacidade(Ah) = Corrente(A) \cdot tempo(h) \quad (2.2)$$

Muitas aplicações não descarregam as baterias com uma corrente constante. A forma como a bateria é descarregada afeta diretamente o tempo de duração e a tensão de descarga. A corrente é normalmente variável ao longo da descarga, de uma forma simplificada ao ser multiplicada a corrente pelo tempo irá produzir uma resposta errada. A curva de descarga de uma bateria é apresentada na Figura 2.1 [41].

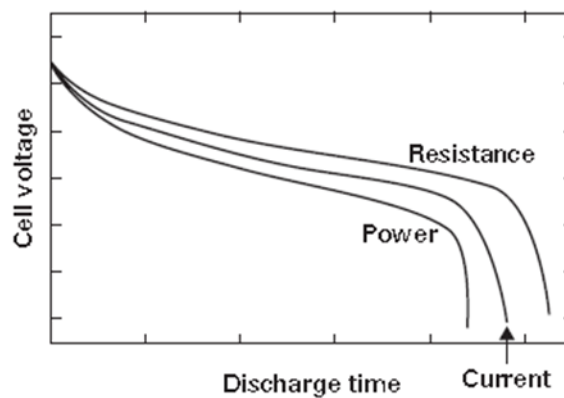


Figura 2.1-Curva de descarga de uma bateria [41].

A capacidade da bateria é calculada integrando a corrente produzida por uma bateria ao longo do tempo de descarga [41].

- **Potência**

A potência instantânea desenvolvida por uma bateria é o produto da diferença de potencial entre os terminais e a corrente que passa através da mesma:

$$P = I \cdot U \quad [W] \quad (2.3)$$

Onde P é a potência (W), I é a corrente (A) e U é a tensão (V). Outras maneiras de escrever uma equação para potência elétrica pode ser através da substituição de V ou I a partir de lei de Ohm [41]:

$$P = I^2 \cdot R ; P = \frac{U^2}{R} \quad (2.4)$$

- **Energia**

A energia fornecida por uma bateria é medida em watt-hora (Wh). Quantifica a duração em horas que uma bateria demora a descarregar quando ligada a uma carga. Assim como no cálculo da capacidade com a corrente constante, a energia fornecida por uma bateria é de simples cálculo quando descarregada com uma carga de energia constante. A energia fornecida pela bateria é dada por:

$$Energia = potência(W) \cdot tempo(h) \quad (2.5)$$

Mais uma vez, se a carga de alimentação não é constante ao longo da descarga, a energia é determinada utilizando a seguinte equação [41]:

$$Energia = \int_0^t U i . dt \quad (2.6)$$

2.3 Constituição de uma bateria

Esta seção descreve alguns termos e definições que são frequentemente utilizadas para descrever as baterias [1].

2.3.1 Células

A bateria pode ser denominada com qualquer acumulador que fornece energia elétrica através de transformações químicas. No entanto, quando se faz referência à sua constituição, é importante compreender a distinção entre bateria e célula. Dessa forma as células são vistas como um bloco básico de construção eletroquímica. As baterias são consideradas como a junção de uma ou mais células. A tensão das células para as baterias mais comuns é apresentada na Tabela 2.5 [1].

Tabela 2.5-Tensão das células para os diferentes tipos de baterias [1]

Tipo de Bateria	Tensão da célula (V)
Chumbo-ácido	2
NiCd	1,3
NiMH	1,2
Li-íon	3,6

Uma bateria é uma montagem de várias células ligadas em série ou em paralelo elétrico, com os terminais elétricos de saídas disponíveis. Na maior parte das baterias as conexões entre as células são feitas internamente. O número de células no interior da bateria pode não ser evidente a partir do invólucro exterior [1].

- **Tensão na célula e bateria**

A tensão de desempenho característica de uma bateria, depende do número de células. Isto significa que a tensão obtida na descarga ou a tensão necessária em carga geralmente é a tensão de uma célula apropriada multiplicada pelo número de células da bateria [1]. Se uma célula de 2 V de eletrólito de chumbo possui uma tensão de carga de 2,4 V, uma bateria de 6 V (3 células) exige uma tensão de carga de $3 \times 2,4 \text{ V}$ i.e., 7,2 V, a 12 V (6 células) a bateria vai exigir 14,4 V, etc. As tensões aos terminais da bateria e para o carregamento, são frequentemente apresentadas numa base por célula. Estes valores podem então ser convertidos para as tensões adequadas para uma bateria específica multiplicando pelo número de células da bateria [1].

- **Capacidade da célula e da bateria**

Enquanto a tensão de uma célula é determinada pelo eletrólito, a capacidade de uma célula é infinitamente variável. A capacidade de uma célula é essencialmente o número de eletrões que podem ser obtidos a partir dela [1]. Uma vez que a corrente é o número de eletrões por unidade de tempo, a capacidade da célula é a integração da corrente fornecida pela célula ao longo do tempo. A Capacidade da célula é normalmente medida em ampere-hora [1].

A capacidade de uma célula é determinada pela quantidade de materiais ativos incluídos nela. As células individuais podem variar a sua capacidade em valores de um ampere-hora a alguns milhares de amperes- hora. A capacidade da célula geralmente é diretamente proporcional ao seu volume, i.e., células maiores geralmente têm uma maior capacidade [1].

- **Ligação de células para formar uma bateria: Série ou Paralelo**

Na ligação múltipla de células em baterias, existem duas opções de ligação: o positivo de uma célula pode ser ligado ao negativo da célula seguinte (ligação em série) ou os terminais positivos serem ligados entre si e os terminais negativos serem ligados entre si (ligação paralela). Ligação em série significa que as tensões das células ligadas são adicionadas enquanto a capacidade se mantém constante. Assim, a tensão da bateria torna a tensão das células multiplicada pelo número de células e a capacidade da bateria é a capacidade da célula individual. Assim, para obter um valor nominal de 12 V DC de saída, uma bateria pode conter 10 células de NiCd em série ou 6 células de eletrólito de chumbo. As ligações série são o método mais convencional de ligação de células [1].

São usadas ligações paralelas quando é necessário uma maior capacidade do que a prevista pela célula individual. Quando possível, é normalmente mais barato e fiável usar uma célula com uma maior capacidade do que interligar várias células em paralelo. No entanto surgem situações em que não existe células com maior capacidade sendo necessária a utilização de uma bateria com células ligadas em paralelo [1].

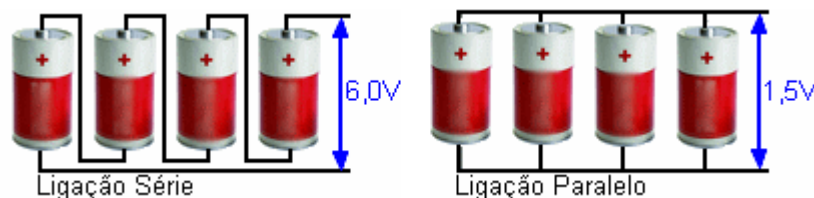


Figura 2.2- Exemplo de ligação série e paralelo em células[42].

2.4 Perfis de Tensão e de Descarga

A bateria de Li-íon tem a tensão das células mais elevada. A tensão média dos sistemas alcalinos varia cerca de 1,65 V e para o sistema de níquel de zinco cerca de 1,1 V. A maior parte das baterias recarregáveis convencionais tem um perfil de descarga plano. As tensões da célula das baterias de íões de Li-íon são mais elevadas do que o das células com eletrólito aquoso convencionais devido às características destes sistemas. O perfil de descarga das baterias de Li-íon, geralmente não é tão plana devido à condutividade inferior dos eletrólitos não aquosos que são utilizados e à termodinâmica das reações nos elétrodos de intercalação. A tensão média de descarga numa célula de Li-íon é de 3,6 V, o que permite que uma célula possa ser substituída por três células de NiCd ou de NiMH na configuração de uma bateria [37]. As curvas de descarga dos sistemas de baterias secundárias convencionais são apresentadas na Figura 2.3 [37].

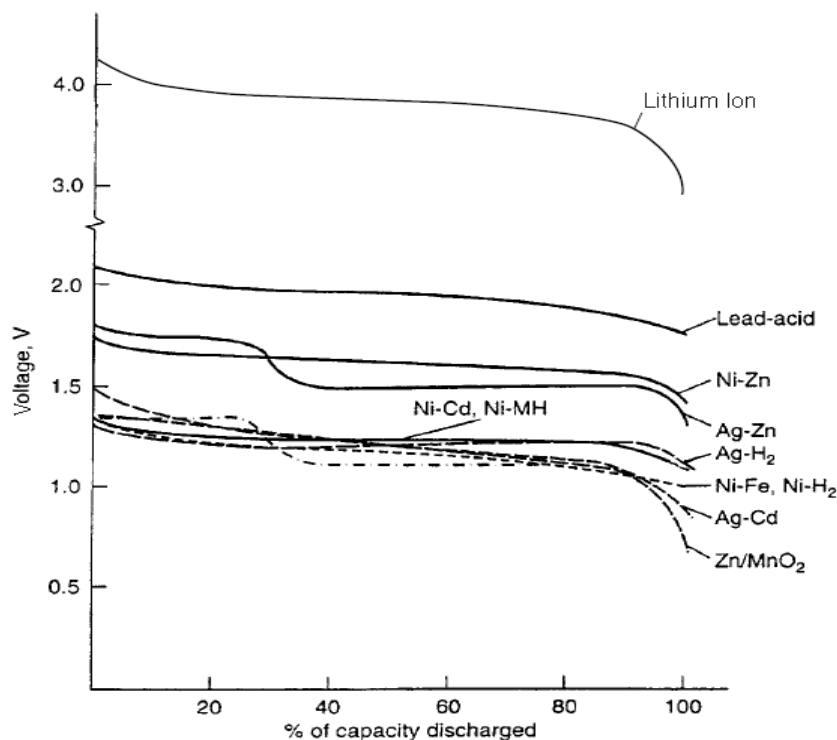


Figura 2.3-Perfis de descarga de sistemas de baterias secundárias convencionais [37].

2.5 Efeito da Descarga na Taxa de Desempenho

A Figura 2.4 mostra a relação das horas de serviço de cada tipo de bateria (uniformizado a 1 kg de peso de bateria) com o nível específico de potência armazenada (corrente de descarga * ponto médio de tensão) por níveis. A inclinação maior indica que existe maior retenção da capacidade com o aumento da potência da carga na descarga [37]. A energia específica é dada por:

$$\text{Energia Específica} = \text{Potência específica} \times \text{horas de serviço} \quad (2.7)$$

$$\frac{Wh}{kg} = \frac{W}{kg} \cdot h = \frac{A \cdot V \cdot h}{kg} \quad (2.8)$$

Os efeitos da taxa de descarga no desempenho dos sistemas de baterias secundárias são apresentados na Figura 2.4.

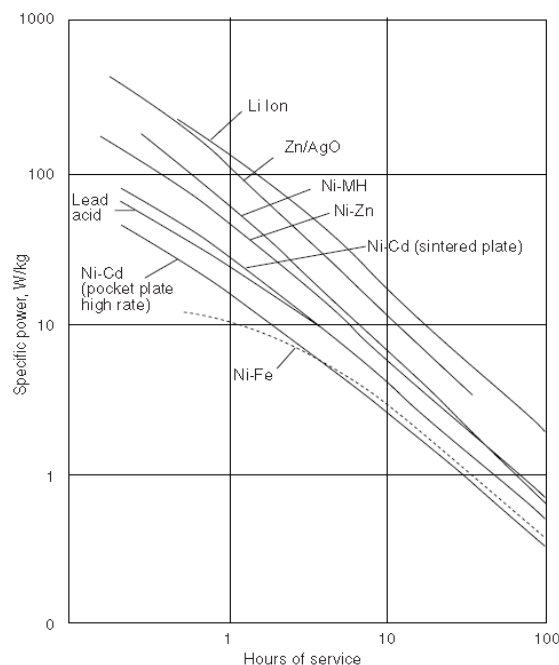


Figura 2.4- Comparação de desempenho de sistemas de baterias secundárias a 20 ° C [37].

2.6 Efeito da Temperatura

O desempenho das várias baterias secundárias num amplo intervalo de temperatura é apresentado na Figura 2.5. Na Figura 2.5, a energia específica é traçada para cada sistema de bateria de -40 a 60 ° C. O sistema de Li-íon tem a maior densidade de energia a -20 ° C. A bateria de NiCd e as baterias de NiMH mostram maior retenção percentual de energia específica. Em geral o desempenho a baixa temperatura das baterias alcalinas é melhor do que o desempenho das baterias de chumbo-ácido, mais uma vez com a exceção de o sistema de níquel-ferro. A bateria de chumbo-ácido e Li-íon apresentam melhores características a temperaturas mais elevadas. Estes dados são generalizados para fins de comparação e sob condições de descarga favorável. O desempenho é fortemente influenciado pelas condições específicas de descarga [37]. O efeito da temperatura é apresentado na Figura 2.5.

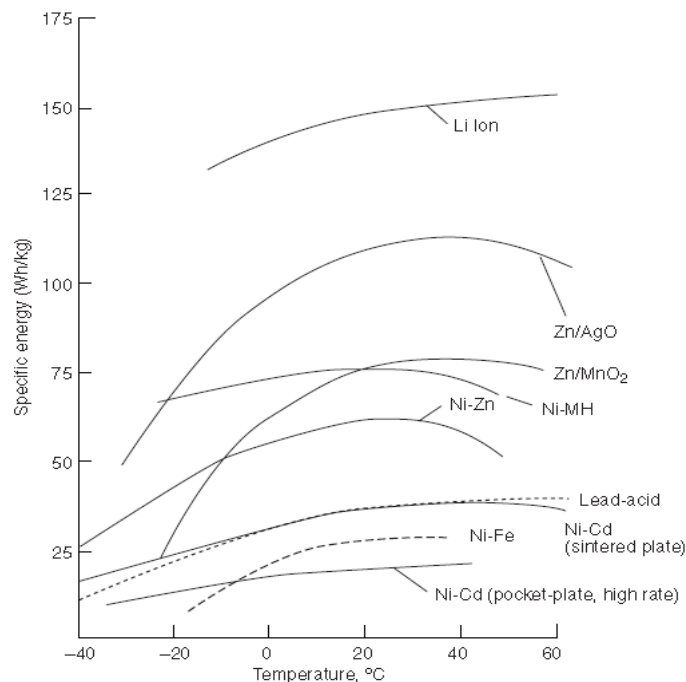


Figura 2.5-Efeito da temperatura na energia específica de sistemas de baterias secundárias [37].

2.7 Taxa de Retenção ou auto-descarga

A taxa de retenção ou de auto-descarga da maior parte das baterias secundárias convencionais é baixa. Normalmente as baterias secundárias são recarregadas periodicamente ou mantidas em "float" se forem para estar num estado de rápida disponibilidade. A maioria das baterias secundárias alcalinas, especialmente as baterias de óxido de níquel, podem ser armazenadas por longos períodos de tempo, mesmo estando descarregadas sem causar danos permanentes, podendo ser recarregadas quando necessário para utilização. As baterias de chumbo-ácido não podem ser armazenadas descarregadas devido à sulfatação das placas, sendo prejudicial para o desempenho da bateria. As propriedades de retenção de carga de diferentes baterias secundárias são apresentadas na Figura 2.6. Estes dados também estão generalizados para efeitos de comparação. Tipicamente a taxa de retenção de capacidade diminui com o aumento do tempo de armazenamento. As baterias secundárias de prata, as de Zn / MnO₂ e as baterias de Li-íon têm as melhores características de retenção das baterias secundárias. A taxa de retenção nas baterias de Li-íon é tipicamente de 2% por mês à temperatura ambiente. As células de prata de baixa taxa podem perder entre 10 a 20% por ano, mas a perda nas células de alta taxa com grandes áreas de superfície poderão ser 5 a 10 vezes superiores. As células seladas e as baterias de níquel-ferro têm as propriedades de retenção de carga mais baixas das baterias alcalinas. [37].

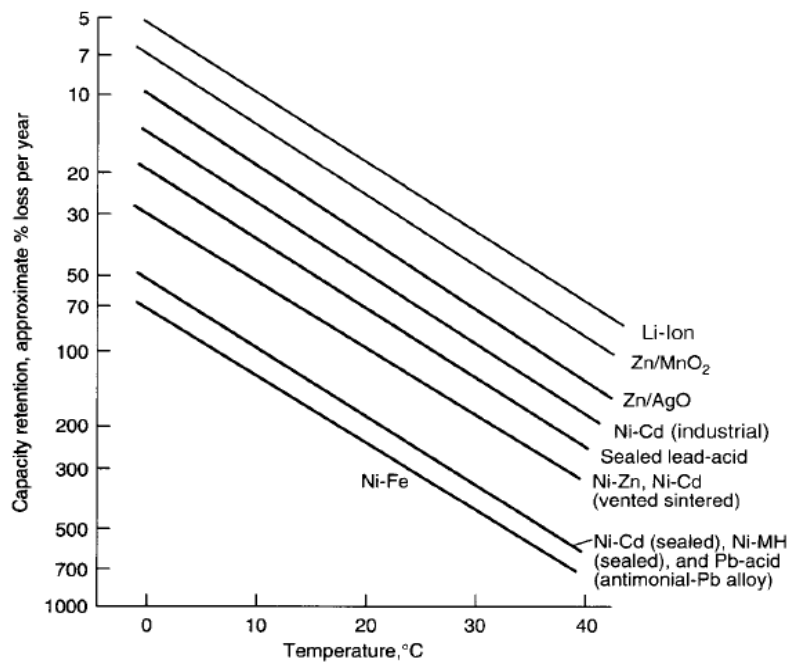


Figura 2.6-Capacidade de Retenção de sistemas de baterias secundárias [37].

2.8 Vida Útil

A profundidade de descarga (DOD) das baterias é apresentada na Figura 2.7. O regime de carga influencia fortemente a vida da bateria. Das baterias secundárias convencionais, a de níquel-ferro e níquel-cádmio do tipo ventilado são os melhores no que diz respeito ao ciclo de vida e duração total da bateria [37].

Uma das desvantagens da utilização de zinco, lítio, e outros metais com elevados padrões potenciais negativos em baterias recarregáveis é a dificuldade de recarga bem-sucedida por forma a obter um bom ciclo e tempo de vida. A bateria de níquel-zinco foi melhorada para fornecer um ciclo de vida prolongado como apresentado na Figura 2.7. As baterias de Li-íon também têm demonstrado bons ciclos de vida [37].

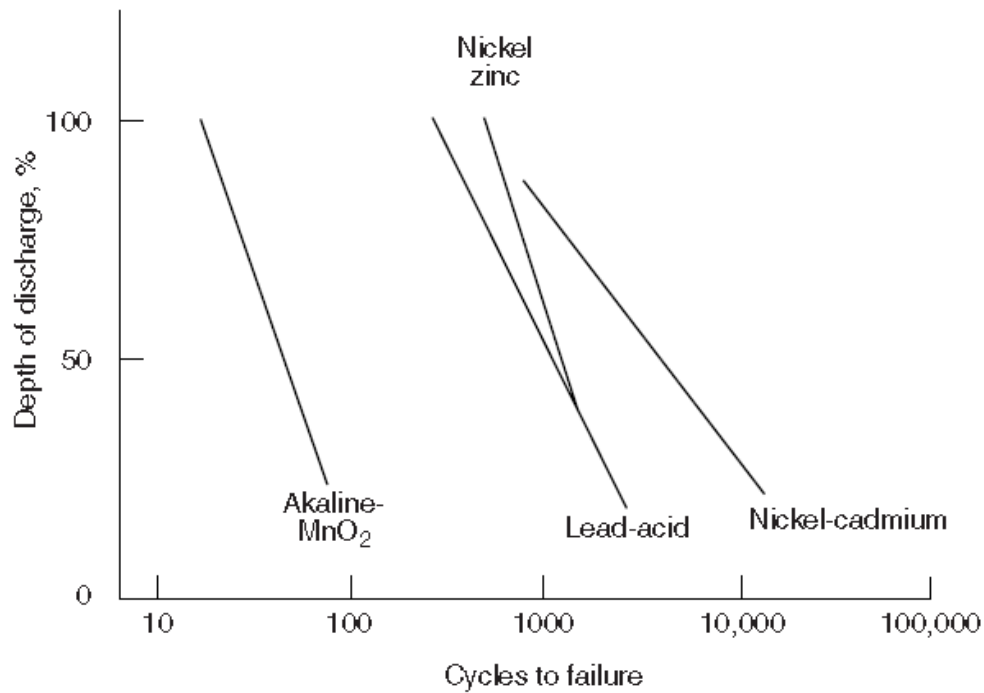


Figura 2.7-Efeito da profundidade de descarga no ciclo de vida de sistemas de baterias secundárias [37].

2.9 Características de Carga

As curvas de carga típica das diferentes baterias a taxas normais de carga a corrente constante são apresentadas na Figura 2.8. Grande parte das baterias podem ser carregadas sob condições de corrente constante, que é geralmente o método preferido de carregamento, embora na prática, a tensão constante ou métodos modificados de tensão constante também são utilizados. Algumas baterias seladas podem não ser carregadas por métodos de tensão constante devido à possibilidade de instabilidade térmica. Geralmente, as baterias de NiCd ventiladas têm as propriedades de carga mais favoráveis podendo ser carregadas por diferentes métodos e num curto espaço de tempo [37].

As baterias de NiCd podem ser carregadas ou sobrecarregadas numa ampla faixa de temperaturas sem se danificarem. As baterias de níquel-ferro, NiMH, NiCd seladas têm

boas características de carga, no entanto a gama de temperaturas é mais limitada para estes sistemas. A bateria de NiMH é mais sensível às sobrecargas, sendo aconselhável o controlo de carga para evitar o sobreaquecimento. As baterias de chumbo-ácido também têm boas características de carga, no entanto devem ser considerados alguns cuidados para evitar o sobreaquecimento excessivo [37].

As baterias de zinco / dióxido de manganês e de zinco / óxido de prata são mais sensíveis no que diz respeito à recarga; a sobrecarga é muito prejudicial na vida útil da bateria. As características típicas de carga a corrente constante e tensão constante de uma bateria de Li-íon é apresentado na Figura 2.9 mostra [37].

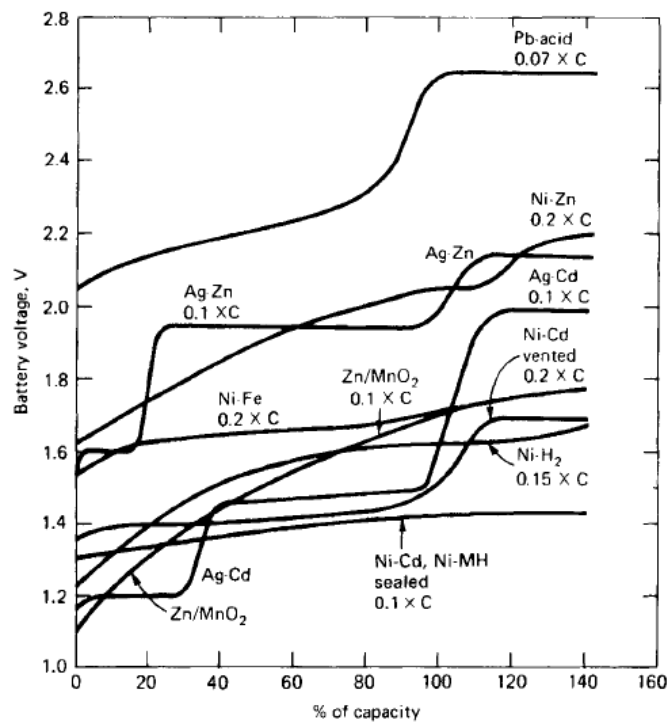


Figura 2.8- Características de carga típicas de sistemas de baterias secundárias, a corrente constante de carga a 20 ° C [37].

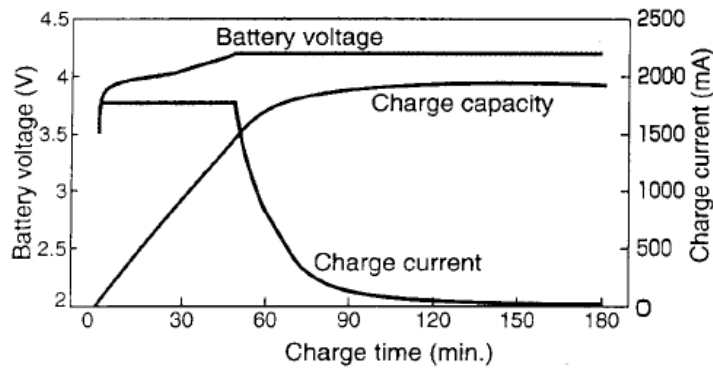


Figura 2.9-Características de uma bateria de Li-íon a 20 ° C [37].

A Bateria é carregada a corrente constante de 1,8 amperes e tensão de 4,2 V.

Muitos fabricantes estão a recomendar métodos de carga rápidos de menos de 2h a 3 h para satisfazer a procura dos consumidores e o seu uso. Estes métodos exigem controlo para cortar a carga antes de ocorrer uma excessiva subida de pressão, ou temperatura na bateria. Em geral, as técnicas de controlo são úteis para a recarga de baterias secundárias [37]. Estas técnicas podem ser utilizadas de várias formas: para evitar a sobrecarga, para facilitar o carregamento rápido, para detetar uma condição anómala de funcionamento, cortando a carga ou reduzir a taxa de carregamento para níveis seguros. Da mesma forma, controlos de descarga também são utilizados para manter o equilíbrio das baterias e para evitar o excesso de descarga. Outra abordagem é a bateria 'inteligente'. Estas baterias integram características, como:

1. Controlar a carga de modo a que a bateria possa ser carregada de forma ideal e segura;
2. Indicador de carga restante na bateria;
3. Dispositivos de segurança para alertar o utilizador para operações inseguras ou indesejáveis, ou para desligar o circuito da bateria quando estes ocorrem [37].

2.10 Custo

O custo de uma bateria secundária pode ser avaliado, dependendo do modo de operação. O custo inicial é uma das considerações; o número de ciclos de carga ou descarga que estão disponíveis; o número de ciclos de energia entregue numa aplicação, durante a vida útil de uma bateria; o custo determinado em um dólar por ciclo ou dólar por total de quilowatt-hora; o custo de carregamento, manutenção e equipamentos associados também podem ter que ser considerados. Em caso de baterias para situações de segurança ou em baterias de *starting, lighting, ignition* (SLI), os fatores a considerar podem ser a vida de calendário da bateria (em vez de ciclo de vida) e o custo é avaliado na base do dólar por ano de funcionamento [37]. As características das tecnologias de baterias mais comuns são apresentadas na Tabela 2.6

Tabela 2.6- Características das tecnologias de baterias mais comuns [40]

	NiCd	NiMH	Chumbo-ácido	Li-íon
Ciclo de Vida	1500	300 a 500	200 a 300	500 a 1000
Impacto ambiental	Alto	Médio/Alto	Alto	Baixo
Tensão da célula	1,3V	1,2V	2V	3,6V
Efeito de Memória	Sim	Pouco	Não	Não
Temperatura de operação (°C)	-20° a +50°	-20° a +60°	-15° a +50°	-20° a +50°
Auto-descarga por mês (%)	<10	<20	<5	<5
Peso	Leve	Leve	Pesada	Muito leve
Tempo de carga	Médio	Médio	Longo	Curto
Densidade de Energia (Wh/kg)	45-80	60-120	30-50	110-160
Custo típico da bateria (US \$, apenas para referência)	\$ 50 (7,2V)	\$ 60 (7,2V)	\$ 25 (6V)	\$ 100 (7,2V)
Custo por ciclo (US \$)	\$ 0,04	\$ 0,12	\$ 0,10	\$ 0,14
Custo a longo prazo	Médio	Médio	Alto	Baixo

2.11 Normas

As normas Nacionais e Internacionais foram criadas pelas organizações para facilitar o comércio, promovendo o incentivo a uma maior compatibilidade e interoperabilidade do produto bem como para definir normas para a segurança do produto, qualidade e fiabilidade.

Na Tabela 2.7 são apresentadas algumas das normas mais comuns, aplicáveis a aplicações das baterias e algumas das organizações que as emitem e ou efetuam a garantia de qualidade e de testes de conformidade. Na Europa, as normas europeias estão a ser gradualmente adotadas em substituição das anteriores normas nacionais.

As cópias das normas podem ser obtidas diretamente a partir das organizações que as emitem ou a partir de bibliotecas públicas [43].

Tabela 2.7-Normas Internacionais para Baterias [43].

Normas Gerais sobre Baterias	
Número da Norma	Título
IEC 60050	International electrotechnical vocabulary. Chapter 486: Secondary cells and batteries.
IEC 60086-2, BS	Batteries - General
USNEC Article 480	Storage Batteries
ISO 9000	A series of quality management systems standards created by the ISO. They are not specific to products or services, but apply to the processes that create them.

ISO 9001: 2000	Model for quality assurance in design, development, production, installation and servicing.
ISO 14000	A series of environmental management systems standards created by the ISO.
ISO/IEC/EN 17025	General Requirements for the Competence of Calibration and Testing Laboratories
Normas baterias de Li-íon	
Número da Norma	Título
BS EN 61960-1:2001, IEC 61960-1:2000	Secondary lithium cells and batteries for portable applications. Secondary lithium cells
BS EN 61960-2:2002, IEC 61960-2:2001	Secondary lithium cells and batteries for portable applications. Secondary lithium batteries
Normas baterias de NiMH	
Número da Norma	Título
BS EN 61436:1998, IEC 61436:1998	Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes. Sealed nickel-metal hydride rechargeable single cells
BS EN 61808:2001, IEC 61808:1999	Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes. Sealed nickel-metal hydride button rechargeable single cells

BS EN 61951-2:2001, IEC 61951-2:2001	Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes. Portable sealed rechargeable single cells. Nickel-metal hydride
BS EN 61951-2:2003	Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes. Portable sealed rechargeable single cells. Nickel-metal hydride
Normas Baterias de NiCd	
Número da Norma	Título
BS EN 60285:1995, IEC 60285:1993	Alkaline secondary cells and batteries. Sealed nickel-cadmium cylindrical rechargeable single cells
BS EN 60623:1996, IEC 60623:1990	Vented nickel-cadmium prismatic rechargeable single cells
BS EN 60623:2001, IEC 60623:2001	Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes. Vented nickel-cadmium prismatic rechargeable single cells
BS EN 60993:2002	Electrolyte for vented nickel-cadmium cells
BS EN 61150:1994, IEC 61150:1992	Alkaline secondary cells and batteries. Sealed nickel-cadmium rechargeable monobloc batteries in button cell design
BS EN 61440:1998, IEC 61440:1997	Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid

	electrolytes. Sealed nickel-cadmium small prismatic rechargeable single cells
BS EN 61951-1:2001, IEC 61951-1:2001	Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes. Portable sealed rechargeable single cells. Nickel-cadmium
Normas Baterias de Chumbo-ácido	
Número da Norma	Título
IEC/TR 62060:2001	Monitoring of lead-acid stationary batteries User guide
BS EN 60254-1:1997, IEC 60254-1:1997	Lead-acid traction batteries. General requirements and methods of test
BS EN 60896-1:1992, IEC 60896-1:1987	Stationary lead-acid batteries. General requirements and methods of test. Vented types
BS EN 60896-2:1996, IEC 60896-2:1995	Stationary lead-acid batteries. General requirements and methods of test. Valve regulated types
BS EN 60896-11:2003	Stationary lead-acid batteries. General requirements and methods of test. Vented types. General requirements and methods of tests
BS EN 61429:1997, IEC 61429:1995	Marking of secondary cells and batteries with the international recycling symbol ISO 7000-1135

CAPÍTULO

3

Modelação de Carga e Descarga

Neste capítulo é apresentada a modelação da carga e descarga de baterias sujeito a condições no que respeita à tecnologia das baterias de chumbo-ácido, iões de lítio, de níquel cádmio, de níquel hidreto metálico, sujeitas a condições dinâmicas. O sistema de carga e descarga é constituído por uma bateria, associada a um sistema de regulação do estado de carga da bateria, uma carga DC e uma fonte de tensão.

3 Modelação de Carga e Descarga

Neste capítulo é apresentada a modelação de carga e descarga de baterias no que respeita à tecnologia de: chumbo-ácido, Li-íon, NiCd ou NiMH. O sistema é constituído por um modelo/bloco que permite a representação das diferentes tipologias de baterias, estando associado um bloco que simula uma carga DC, uma fonte de tensão e um sistema que permite regular o estado de carga e descarga da bateria.

Os modelos são elaborados com base no modelo apresentado em [44]. O modelo permite caraterizar o comportamento dos diferentes tipos de baterias. O esquema equivalente de carga e descarga é apresentado na Figura 3.1.

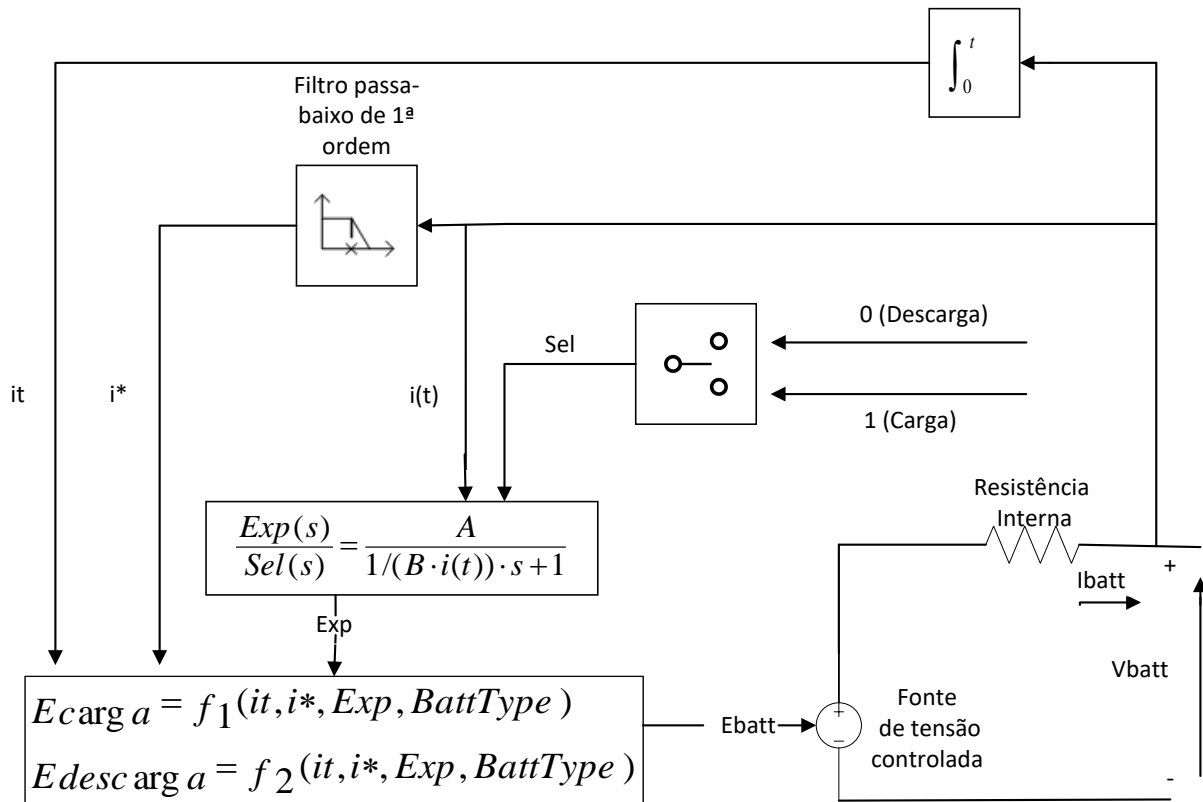


Figura 3.1-Circuito equivalente de carga e descarga da bateria [45].

3.1 Descarga

O modelo da descarga em estudo é o modelo de Shepherd, apresentado em [45]. Tem a vantagem de modelar com precisão a dinâmica da tensão quando a corrente de descarga é variável ao longo do tempo. O modelo também tem em conta a tensão em circuito aberto (OCV) em função do SOC [46].

- **Modelo de Chumbo-Ácido**

O comportamento de descarga da bateria de chumbo-ácido [45] é dado por:

Modelo de Descarga ($i^* > 0$)

$$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K_1 \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K_2 \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + L^{-1}\left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0\right) \quad (3.1)$$

Sendo:

$Exp(s)$ = Exponencial (V)

$Sel(s)$ = Representa o modo da bateria.

$Sel(s) = 0$ durante a descarga da bateria,

$Sel(s) = 1$ durante a carga da bateria.

K_1 = Resistência de Polarização (Ω)

K_2 = Constante de polarização (V/Ah)

i^* = Dinâmica de corrente de baixa frequência (A)

i = Corrente da Bateria (A)

it = Capacidade extraída (Ah)

Q = Capacidade máxima da bateria (Ah)

- **Iões de Lítio**

O modelo do comportamento de descarga da bateria de íons de lítio [45] é dado por:

Modelo de Descarga ($i^* > 0$)

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K_1 \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K_2 \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (3.2)$$

Sendo:

$A = \text{Tensão Exponencial (V)}$

$B = \text{Capacidade Exponencial (Ah)}^{-1}$

- **Níquel-Cádmio e Níquel Hidreto Metálico**

O comportamento de descarga da bateria de NiCd e NiMH [45] é dado por:

Modelo de Descarga ($i^* > 0$)

$$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K_1 \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K_2 \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + L^{-1}\left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0\right) \quad (3.3)$$

3.2 Carga

Baterias de Chumbo-ácido e de Iões de Lítio

O modelo de carga depende do tipo de bateria a ser estudado, uma vez que para cada tipo de bateria a característica de fim de carga (EOC) difere. As baterias de Chumbo – ácido, Li-íon têm as mesmas características de EOC, pois a tensão aumenta bruscamente quando a bateria atinge a carga máxima. Esta característica é modelada pela resistência de polarização. Neste caso, a resistência de polarização aumenta até ao ponto em que a bateria está praticamente carregada. Quando atinge este ponto a corrente é nula ($i_t=0$) e a resistência de polarização aumenta bruscamente.

A resistência de polarização é dada por:

$$\text{Resistência Polarização} = K_1 \cdot \frac{Q}{i_t} \quad (3.4)$$

Teoricamente, quando $i_t=0$ a bateria está completamente carregada, a resistência de polarização é infinita [45] existindo um desvio de cerca de 10% entre o ponto de corrente $i_t=0$ e o ponto de carga máxima [45]. Sendo reescrita a equação 3.4:

$$\text{Resistência Polarização} = K_1 \cdot \frac{Q}{i_t - 0.1 \cdot Q} \quad (3.5)$$

Baterias de Níquel Cádmio e Níquel Hidreto Metálico

Estas baterias têm um comportamento particular para a EOC. Após a bateria atingir a tensão de carga completa, a tensão diminui lentamente, dependendo da amplitude da corrente. Esta característica é importante neste modelo visto a monitorização de carga ΔV fazer parar o carregamento. Este comportamento é representado pela alteração da resistência de polarização de carga. Quando a bateria está totalmente carregada ($it=0$) a tensão começa a cair. O carregador continua a sobrecarregar a bateria ($it<0$) e a tensão diminui. Esta característica pode ser representada pela diminuição da resistência de polarização quando a bateria está sobrecarregada, usando o valor absoluto do valor da carga (it)[45].

A resistência de polarização [45] é dada por:

$$\text{Resistência Polarização} = K_1 \cdot \frac{Q}{|it| - 0.1 \cdot Q} \quad (3.6)$$

- **Chumbo-Ácido**

O comportamento da carga da bateria de chumbo-ácido [45] é dado por:

Modelo de Carga ($i^* < 0$)

$$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K_1 \cdot \frac{Q}{it + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K_2 \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + L^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (3.7)$$

- **Iões de Lítio**

O comportamento da carga da bateria de íons de lítio [45] é dado por:

Modelo de Carga ($i^* < 0$)

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K_1 \cdot \frac{Q}{it + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K_2 \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (3.8)$$

- **Níquel Cádmio e Níquel Hidreto Metálico**

O comportamento da carga da bateria de NiCd e NiMH [45] é dado por:

Modelo de Carga ($i^* < 0$)

$$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K_1 \cdot \frac{Q}{|it| + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K_2 \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + L^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (3.9)$$

3.3 Sistema Simulado

O sistema de carga e descarga de baterias foi implementado em Matlab/Simulink. O método de integração utilizado para a resolução das equações de estado do sistema é o ode23s stiff/mod.Rosenbrock de 2ª ordem. O método permite amplitudes de intervalo de integração médias, possibilitando uma relativa precisão. Este método é simples e robusto e é reconhecido como um bom método genérico para a integração de equações. O passo variável e tolerância relativa é de 1 ms.

O sistema simulado de carga e descarga de baterias em estudo é apresentado na Figura 3.2.

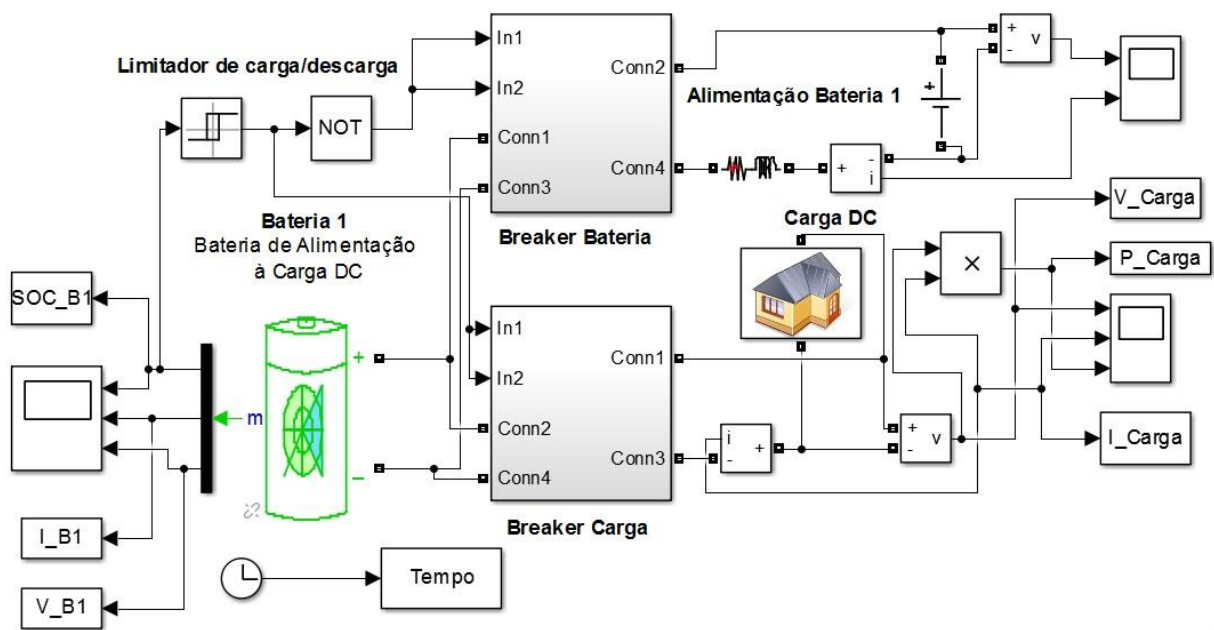


Figura 3.2-Configuração do sistema simulado.

O sistema simulado é constituído pelos blocos denominados de: “*Bateria 1, Bateria de Alimentação à Carga DC*”, “*Breaker Bateria*”, “*Breaker Carga*”, “*Carga DC*”, “*Alimentação Bateria 1*” e “*Limitador de carga/descarga*” que têm as seguintes funções:

O comportamento das baterias no que respeita à tecnologia da bateria de chumbo-ácido, íões de lítio, níquel cádmio ou de níquel hidreto metálico e o seu processo de carga e

descarga, são apresentadas as configurações dos blocos mais importantes. O bloco da “Bateria 1, Bateria de Alimentação à Carga DC” é implementado um modelo constituído por blocos do toolbox SimPowerSystems, permitindo a simulação do comportamento das baterias. A construção do modelo tem como base a implementação de modelos matemáticos, que diferem consoante a tecnologia da bateria e o processo de carga e descarga.

O Bloco em SimPowerSystems da *Bateria 1* é apresentado na Figura 3.3

O subsistema em código *MatLab/Simulink* da *Bateria 1*, é constituído pelos blocos denominados: de *E_dyn_Discharge*; *E_dynCharge* e *Batt.R*. Estes subsistemas estão representados na Figura 3.3, na Figura 3.4 e na Figura 3.5.

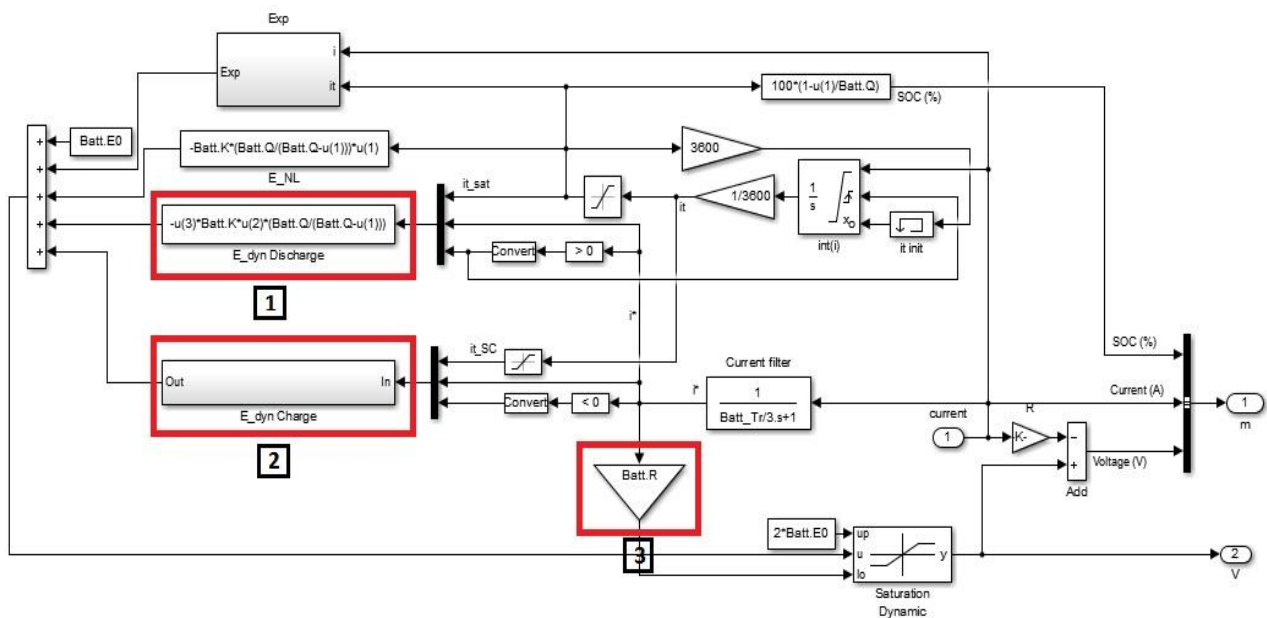


Figura 3.3-Subsistema da Bateria 1[44].

Em 1 é implementada a descarga parametrizável de acordo com (3.1), (3.2) e (3.3).

$$-u(3) * \text{Batt.K} * u(2) * (\text{Batt.Q}/(\text{Batt.Q} - u(1)))$$

E_dyn Discharge

Figura 3.4-Função de descarga em *MatLab/Simulink* da bateria 1.

Em 2 é construído um bloco que permite fazer a seleção do tipo de bateria na carga de acordo com as (3.7), (3.8) e (3.9). O bloco que permite selecionar o tipo de bateria é apresentado na Figura 3.5.

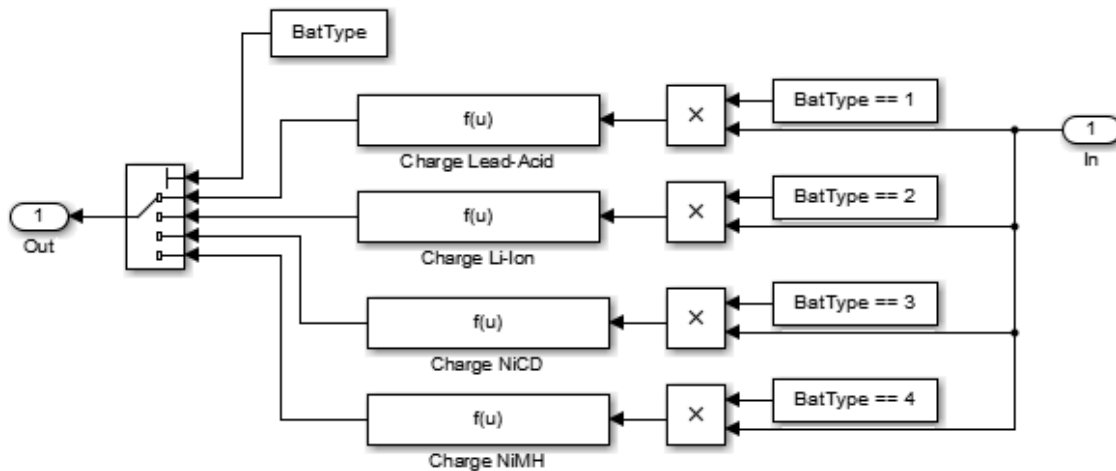


Figura 3.5-Bloco que permite selecionar o tipo de bateria[44].

Em 3 é implementado um bloco de ganho que representa a resistência interna da bateria, sendo este influenciado pelo tipo de bateria em estudo. O bloco resistência interna da bateria é apresentado na Figura 3.6.

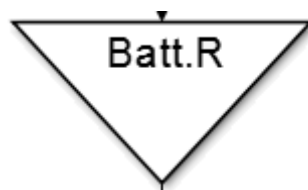


Figura 3.6-Bloco resistência interna da bateria[44].

O bloco *Parâmetros de ajuste bateria 1* permite o interface entre o utilizador e o modelo implementado em *Matlab/Simulink* como apresentado na Figura 3.3, bem como a edição de alguns campos de características das baterias. A caixa de diálogo e os parâmetros para o modelo da bateria 1, são apresentados na Figura 3.7, na Figura 3.78 e na Figura 3.9.

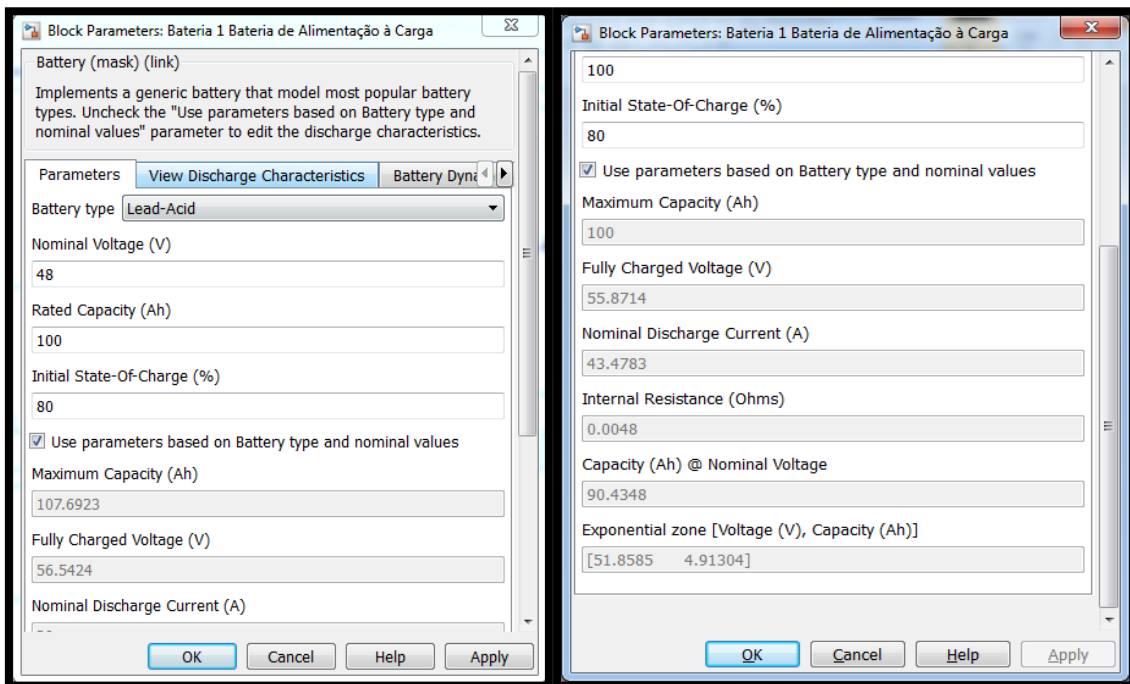


Figura 3.7 e Figura 3.8 -Parâmetros de ajuste bateria 1[44].

Os principais parâmetros das baterias em estudo são apresentados de seguida:

- **Tipo de Bateria**

Disponibiliza um conjunto de comportamentos de carga para as quatro diferentes tecnologias de baterias, chumbo-ácido, Li-íon, NiCd e NiMH.

- **Tensão Nominal (V)**

A tensão nominal (V_{nom}) da bateria (V). A tensão nominal representa o fim da zona linear das características de descarga.

- **Capacidade Nominal (Ah)**

A capacidade nominal (Q_{rated}) da bateria (Ah). A capacidade nominal é a capacidade mínima eficaz da bateria.

- **Estado Inicial de Carga (%)**

O estado inicial de carga (SOC) da bateria varia entre, 0% e 100%, sendo 0% o estado de vazia e 100% o estado de totalmente carregada. Este parâmetro é utilizado como uma condição inicial para a simulação, não afetando a curva de descarga.

- **Usar Parâmetros com Base no Tipo de Bateria e Valores Nominais**

Quando esta opção se encontra ativa, permite carregar os parâmetros predefinidos na caixa de diálogo, dependendo da tecnologia da bateria selecionada. No entanto caso esta opção esteja desativada é possível editar todos os campos:

- 1) Capacidade máxima (Ah);
- 2) Tensão máxima de carga (V);
- 3) Corrente nominal de descarga (A);
- 4) Resistência interna (Ω);
- 5) Capacidade (Ah) à tensão nominal;
- 6) Zona exponencial, Tensão (V), Capacidade (Ah).

O interface das características de descarga da bateria, é complementado com os parâmetros demonstradas na Figura 3.7 e Figura 3.8. Este interface permite a edição de um campo característico para a simulação da curva de descarga. A caixa de diálogo é apresentada na Figura 3.9.

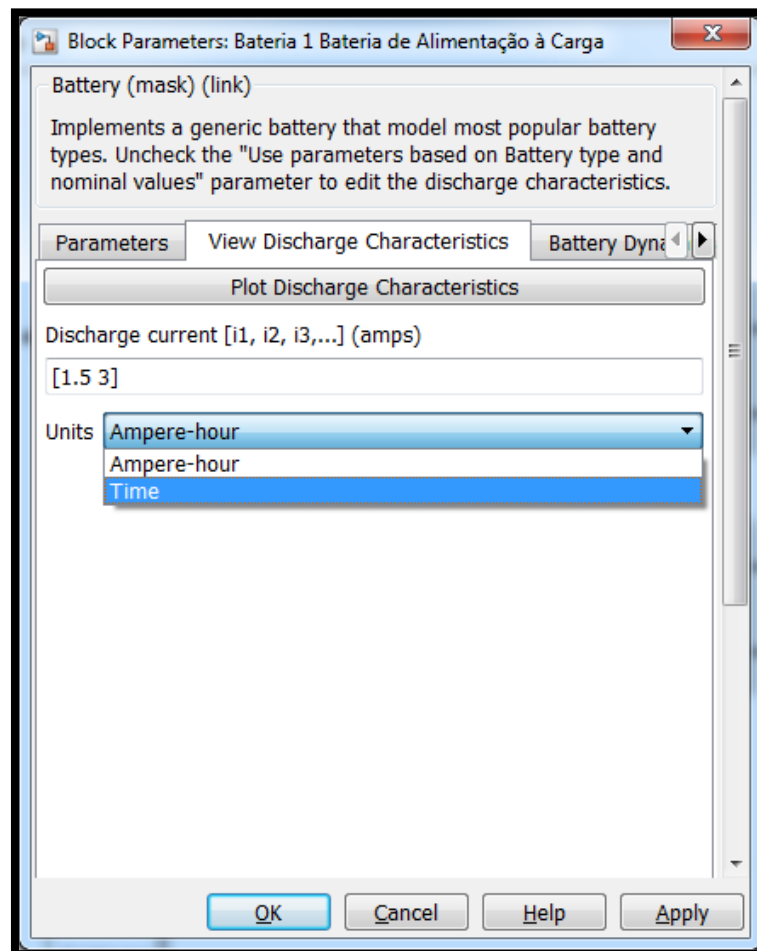


Figura 3.9-Parâmetros bateria 1[44].

Para a impressão gráfica das características de descarga, é necessário:

- A escolha da corrente ou correntes de descarga desejáveis;
- As opções das Unidades, *ampere-hora* ou *tempo*.

No bloco “*Breaker Bateria*” é controlada a comutação ao carregamento da bateria 1, podendo este tomar valores de 0 ou 1, aberto ou fechado respectivamente. O bloco “*Breaker Bateria*” é apresentado na Figura 3.10.

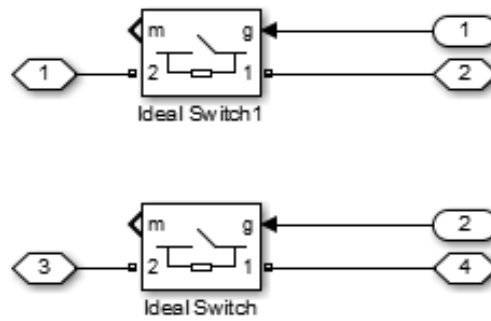


Figura 3.10-Bloco “Breaker Bateria”.

No bloco “*Breaker Carga*” é controlada a comutação na alimentação da carga DC, podendo este tomar valores de 0 ou 1, aberto ou fechado respetivamente. O bloco em “*Breaker Carga*” é apresentado na Figura 3.11.

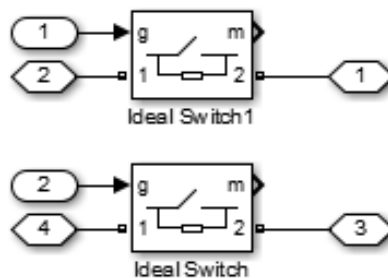


Figura 3.11- Bloco “Breaker Carga”.

O bloco “*Alimentação Bateria 1*” é constituído por uma fonte de tensão parametrizável. A fonte de tensão caracteriza o método de carregamento da bateria 1, tensão contante. O bloco “*Alimentação Bateria 1*” é apresentado na Figura 3.12.

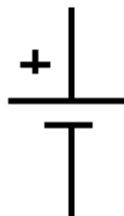


Figura 3.12- Bloco “Alimentação Bateria 1”.

O bloco “*Carga DC*” é constituído por uma resistência que simula a descarga da bateria 1 e em que a tensão aos terminais da resistência é imposta pelo valor de tensão da bateria. O bloco “*Carga DC*” é apresentado na Figura 3.13.

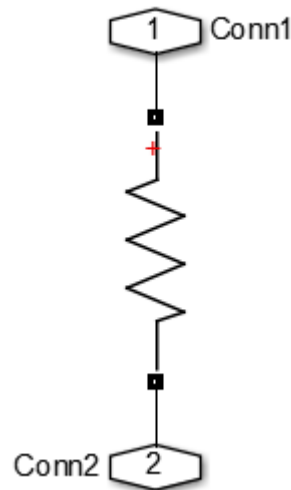


Figura 3.13- Bloco “Carga DC”.

O bloco “*Limitador de Carga/Descarga*” é constituído pelos blocos *Relay* e um Operador Lógico *NOT*. Existem dois estados de implementação para o processo de carga e descarga da bateria 1.

Durante o processo de carga da Bateria 1, este bloco, permite limitar o SOC e a descarga a um valor pré-definido. O bloco “*limitador de Carga/Descarga*” é apresentado na Figura 3.14.

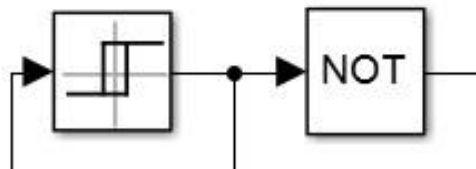


Figura 3.14- Bloco “Limitador de Carga/Descarga”.

CAPÍTULO

4

Simulação Computacional

Neste capítulo são apresentados os casos de estudo e os resultados obtidos, recorrendo a simulações computacionais, sobre o desempenho da carga e descarga de baterias, cuja modelação foi feita no Capítulo 3.

4 Simulação computacional

Neste capítulo são apresentados casos de estudo e os resultados obtidos, recorrendo a simulações computacionais, sobre o desempenho do modelo de carga e descarga de baterias, cuja modelação foi feita no capítulo anterior.

O modelo utilizado foi implementado em *Matlab/Simulink* e permitiu avaliar o comportamento de baterias em regime de carga e descarga. As tecnologias de baterias simuladas são: chumbo ácido, íões de lítio, níquel cádmio e níquel hidreto metálico.

Com as simulações computacionais foi possível avaliar o comportamento dinâmico do sistema de carga e descarga de baterias, nomeadamente a:

- SOC;
- Tensão na bateria;
- Corrente na bateria;
- Zona Exponencial;
- Caraterística de descarga;
- Corrente na carga DC;
- Tensão na carga DC;
- Potência na carga DC.

O método de integração utilizado para a resolução das equações dinâmicas do sistema foi o ode23s stiff/mod.Rosenbrock, com passo variável e uma tolerância relativa 1ms.

O modelo permite a parametrização de um conjunto de características técnicas, da bateria. A carga ligada à bateria no circuito DC também é parametrizável. Uma fonte de tensão permite efetuar a carga da bateria em estudo, podendo esta ser ajustada de acordo com os valores da tensão aos terminais da bateria a ser carregada. A

parametrização depende de fabricante para fabricante, e da tecnologia da bateria utilizada. O regulador de carga da bateria, permite fazer um controlo ao estado de carga e descarga da bateria.

O sistema de carga e descarga considerado na simulação, foi: a Bateria 1 tem uma tensão de 48 V, a ser descarregada por uma carga constante DC, com um valor de potência considerada de 1,5 kW. Quando a bateria descarrega até um valor de SOC, inferior a 40%, a carga DC é desligada e a fonte de tensão carrega a Bateria 1 até repor o SOC no valor de 80%, assim que esta se encontra carregada, o ciclo é repetido. Para efetuar o carregamento da Bateria 1, o valor de tensão da fonte terá que ser sempre superior ao nível de tensão da Bateria 1 e de acordo com as especificações técnicas com base na tecnologia da bateria e parâmetros nominais, sendo o valor considerado de referência, 60 V [44].

Tabela 4.1- Parâmetros principais da bateria de chumbo-ácido

Bateria de Chumbo-Ácido		
	Valor	Unidades
Tensão Nominal	48	V
Capacidade Nominal	100	Ah
Estado Inicial SOC	80	%
Capacidade Máxima	104,17	Ah
Tensão Totalmente Carregada	52,26	V
Corrente Nominal de Descarga	20	A
Resistência Interna (estimada)	4,8	mΩ
Capacidade à Tensão Nominal	31,03	Ah
Zona Exponencial	[48,87; 0,33]	[V; Ah]

Tabela 4.2-Parâmetros principais da bateria de íões de lítio

Bateria de Íões de Lítio		
	Valor	Unidades
Tensão Nominal	48	V
Capacidade Nominal	100	Ah
Estado Inicial SOC	80	%
Capacidade Máxima	100	Ah
Tensão Totalmente Carregada	55,87	V
Corrente Nominal de Descarga	43,48	A
Resistência Interna (estimada)	4,8	mΩ
Capacidade à Tensão Nominal	90,43	Ah
Zona Exponencial	[51,86; 4,91]	[V; Ah]

Tabela 4.3-Parâmetros principais da bateria de níquel cádmio

Bateria de Níquel Cádmio		
	Valor	Unidades
Tensão Nominal	48	V
Capacidade Nominal	100	Ah
Estado Inicial SOC	80	%
Capacidade Máxima	113,64	Ah
Tensão Totalmente Carregada	54,92	V
Corrente Nominal de Descarga	20	A
Resistência Interna (estimada)	4,8	mΩ
Capacidade à Tensão Nominal	96,14	Ah
Zona Exponencial	[51,22; 27,95]	[V; Ah]

Tabela 4.4-Parâmetros principais da bateria de hidretos metálicos de níquel

Bateria de Hidretos Metálicos de Níquel		
	Valor	Unidades
Tensão Nominal	48	V
Capacidade Nominal	100	Ah
Estado Inicial SOC	80	%
Capacidade Máxima	107,69	Ah
Tensão Totalmente Carregada	56,54	V
Corrente Nominal de Descarga	20	A
Resistência Interna (estimada)	4,8	mΩ
Capacidade à Tensão Nominal	96,15	Ah
Zona Exponencial	[52,07; 20]	[V; Ah]

Tabela 4.5-Parâmetros da *carga DC*, da *fonte de tensão* e *breaker da bateria 1*

Carga DC		
Tensão	48	V
Resistência	1,54	Ω
Potência	≈ 1500	W
Fonte de Tensão		
Tensão	60	V
Breaker Bateria 1		
Limite Superior SOC	80	%
Limite Inferior SOC	40	%

4.1 Simulação 1 – Bateria de Chumbo-ácido

A simulação computacional apresenta o comportamento do sistema de carga e descarga tendo em consideração os parâmetros da Tabela 4.1 e da Tabela 4.5.

4.1.1 Comportamento do SOC

Um dos parâmetros importantes para aumentar a longevidade dos ciclos de vida de uma bateria, é o controlo do SOC durante o processo de carga e descarga.

O comportamento do SOC é apresentado na Figura 4.1.

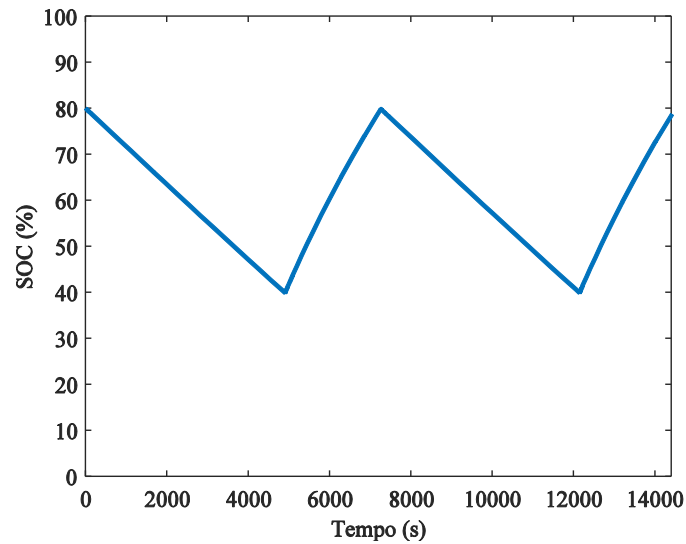


Figura 4.1-Comportamento do SOC.

Esta simulação foi efetuada com uma variação de SOC compreendido entre 80% e 40%, num horizonte temporal de 14400 s, i.e., 4 h. Durante os 4890 s iniciais (≈ 1 h 22 min) a bateria descarrega de uma forma constante até o valor de SOC alcançar os 40%. A partir daí inicia o processo de carga de uma forma constante até a bateria atingir o valor de SOC de 80%, durante 2353 s, i.e., entre o intervalo de tempo de 4890 s; 7243 s, (≈ 39 min).

4.1.2 Tensão na Bateria 1

O comportamento da tensão é apresentado na Figura 4.2.

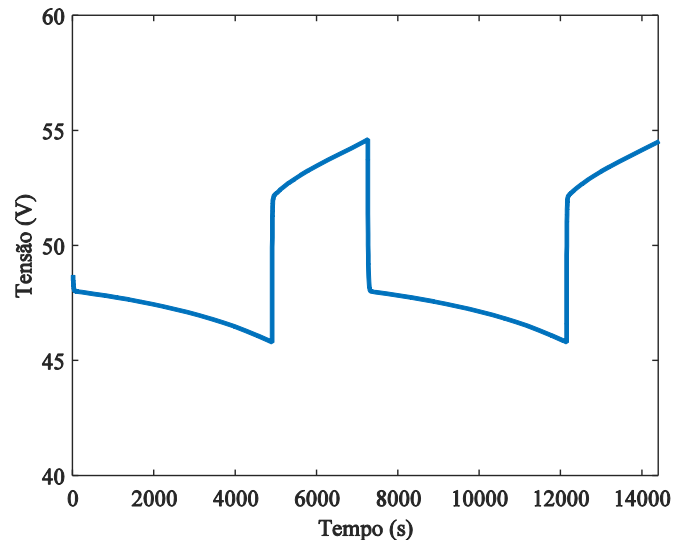


Figura 4.2-Tensão na Bateria 1.

Esta simulação foi considerada com a tensão da Bateria 1 no valor de 48 V, sendo a tensão de alimentação, i.e., da fonte de tensão, aos terminais da Bateria 1 durante o processo de carga de 60 V. Nos instantes iniciais até aos 4890 s, período em que a bateria se encontra em regime de descarga, o valor de tensão varia entre 48 V e os 45,82 V sendo o comportamento de descarga ligeiramente curvilíneo de concavidade voltada para cima. No processo de carga o valor de tensão varia de forma exponencial entre os 48,87 V e os 54,6 V no intervalo de tempo de 4890 s a 7243 s, i.e., ≈ 39 min.

4.1.3 Corrente na Bateria 1

O comportamento da corrente é apresentado na Figura 4.3:

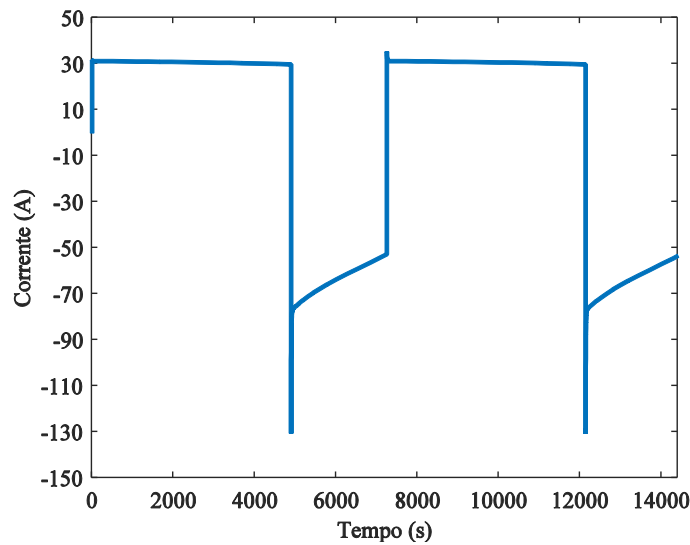


Figura 4.3-Corrente na Bateria 1.

Na avaliação do comportamento de descarga da bateria, é verificado que a corrente, é praticamente constante com um valor de 30 A, durante os 4890 s iniciais (1,36 h). Tendo a Bateria 1 uma de capacidade máxima de 104,17 Ah (Tabela 4.1) é percebido através da Figura 4.1 que o intervalo de capacidade estudado, varia entre:

$$Capacidade\ Bateria\ 1_{80\%} = 104,17 \cdot 0,8 = 83,34\ Ah \quad (4.1)$$

$$Capacidade\ Bateria\ 1_{40\%} = 104,17 \cdot 0,4 = 41,67\ Ah \quad (4.2)$$

$$[83,34\ Ah; 41,67Ah]$$

Visto a diferença entre o intervalo de estudo ser 41,67 Ah,

$$Corrente\ na\ Bateria\ 1 = \frac{41,67\ Ah}{1,36\ h} = 30,6\ A \quad (4.3)$$

Conseguimos assim comprovar o valor aproximado da corrente através dos cálculos, de 30,6 A e comparar com o valor retirado a partir da Figura 4.3 de 30 A. No início do processo de carga é verificado um pico de corrente no instante $t=4890$ s, e $i=-130$ A, sendo que a partir daí e até $t=7243$ s apresenta um crescimento exponencial negativo até aos -52 A. O valor negativo de corrente está associado ao facto de a Bateria se encontrar a absorver energia.

4.1.4 Zona Exponencial

A correlação existente entre a Tensão e o SOC permite comprovar a histerese na bateria, sendo apresentado na Figura 4.4.

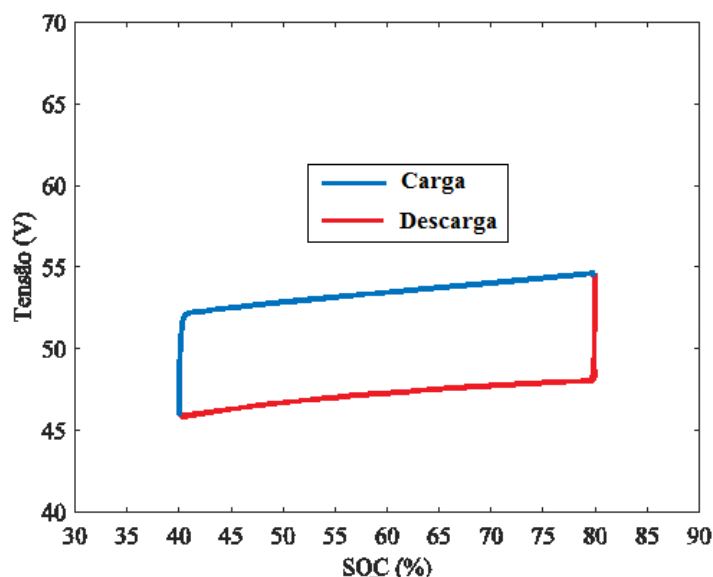


Figura 4.4-Histerese.

A zona exponencial Exp (s) representa a histerese durante os ciclos de carga e descarga, respetivamente a azul e a vermelho. No ciclo de carga é verificado a variação do SOC entre os 40% e os 80%, com o valor de tensão a oscilar exponencialmente entre 48,87 V e 54,6 V. Os aumentos de tensão exponenciais quando a bateria está a ser carregada, não está interligado diretamente com o SOC da bateria. Quando a bateria está a descarregar, a tensão diminui imediatamente com um comportamento exponencial entre os 48 V e os 45,82 V.

4.1.5 Características de Descarga

O comportamento genérico de descarga é apresentado na Figura 4.5.

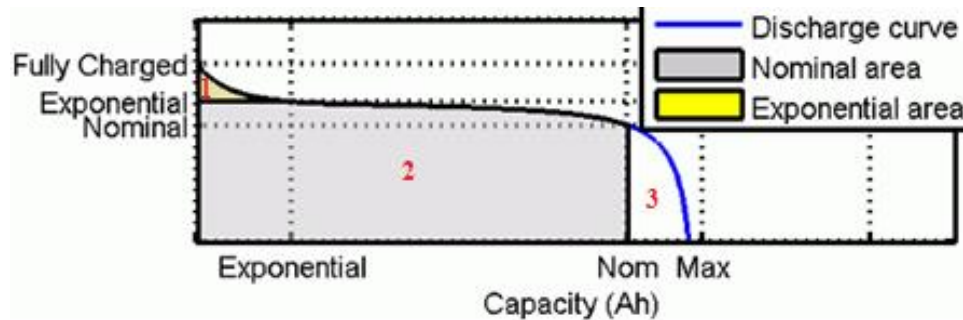


Figura 4.5-Curva de Descarga típica.

A primeira secção (1) representa a queda de tensão exponencial quando a bateria está carregada. Dependendo da tecnologia da bateria, esta área é mais ou menos larga. A segunda secção (2) representa a carga que pode ser extraída a partir da bateria, até que a tensão cai abaixo da tensão nominal da bateria. Finalmente, a terceira secção (3) representa a descarga total da bateria, quando a tensão cai rapidamente.

A curva de descarga para a bateria de chumbo-ácido é apresentada na Figura 4.6.

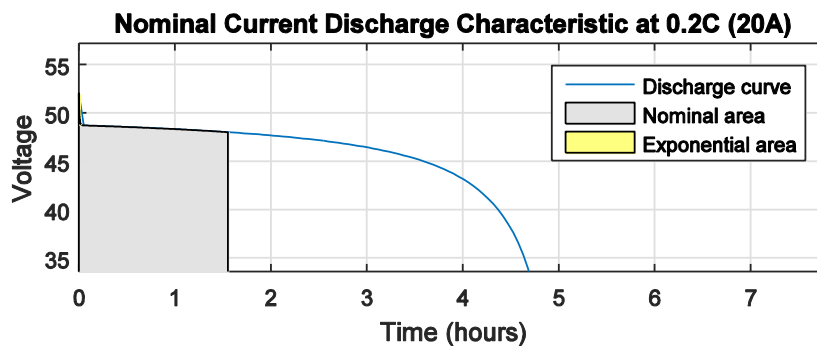


Figura 4.6-Curva de descarga à corrente nominal.

A curva de descarga é simulada à corrente nominal de 20 A, num ciclo completo de descarga da bateria dos 100% SOC a 0% SOC, tendo uma duração de 4 h e 44 min. A área exponencial é iniciada em 52,26 V e termina em 48,87 V durante aproximadamente 5 min. A área nominal termina em 47,5 V em $t = 1$ h e 32 min.

Os resultados da simulação apresentados na Figura 4.1, na Figura 4.2, na Figura 4.3, na Figura 4.4, na Figura 4.5 e na Figura 4.6 permitem concluir que a bateria apresenta um comportamento coerente com o que os estudos teóricos e o conhecimento do comportamento da bateria levavam a prever.

4.1.6 Comportamento da Tensão na Carga DC

O comportamento da tensão na Carga DC é apresentado na Figura 4.7.

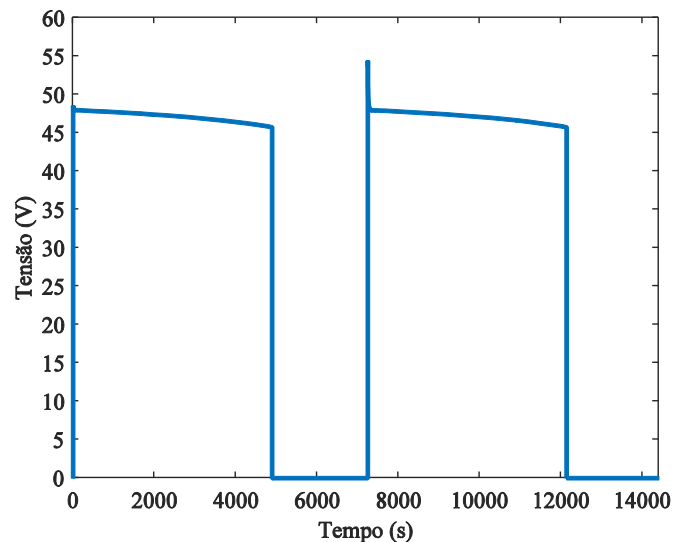


Figura 4.7-Comportamento da tensão na carga DC.

Da análise do comportamento da tensão imposta aos terminais da Carga DC, é verificado que no período em que a Carga DC está ligada, a tensão inicial tem o valor de 48 V e vai decrescendo até alcançar o valor de 45,82 V, i.e., um decréscimo de 4,5% até ao instante $t=4890$ s. A partir do instante $t=4890$ s a Carga DC é desligada até $t=7243$ s, com um valor de tensão aos terminais da carga de 0 V.

4.1.7 Comportamento da corrente na Carga DC

O comportamento da corrente na Carga DC é apresentado na Figura 4.8.

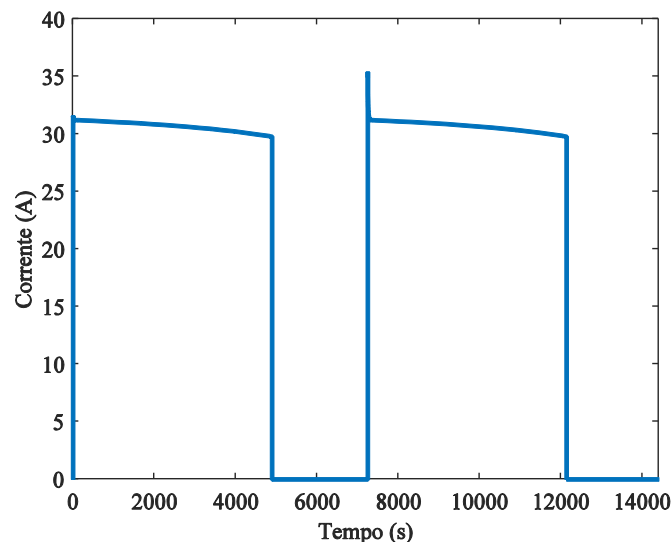


Figura 4.8-Corrente na Carga DC.

Da análise do comportamento à corrente absorvida pela carga DC, é verificado que no período em que a Carga DC está ligada, a corrente inicial tem o valor de 31,2 A e vai decrescendo até alcançar o valor de 29,8 A, i.e., um decréscimo de 4,5% até ao instante $t=4890$ s. A partir do instante $t=4890$ s a carga DC é desligada até $t=7243$ s passando o valor de corrente na carga a ser de 0 A.

4.1.8 Potência da Carga DC

O comportamento da potência na carga DC é apresentada na Figura 4.9.

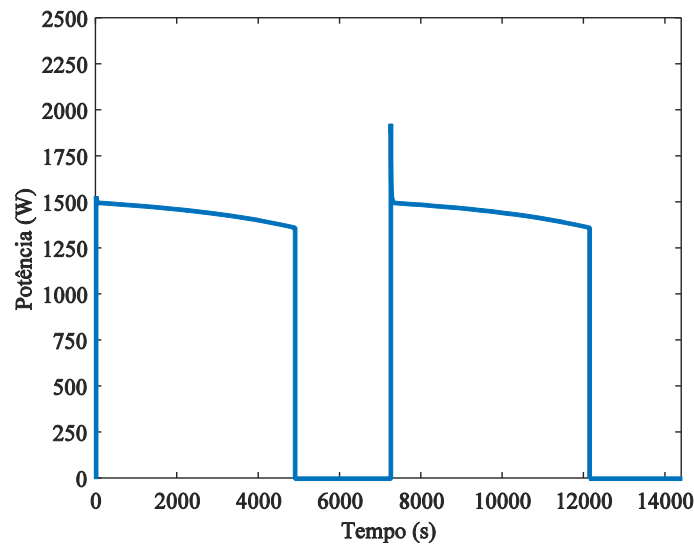


Figura 4.9-Potência na Carga DC.

O comportamento da potência absorvida pela carga DC está diretamente relacionada com a tensão e corrente apresentados na Figura 4.7 e na Figura 4.8. No instante inicial $t_0 = 0 \text{ s}$ a potência tem o valor de 1498 W e no instante final $t_{final} = 4890 \text{ s}$ a potência tem o valor de 1498 W .

4.2 Simulação 2 – Bateria de Iões de Lítio

A simulação computacional apresenta o comportamento do sistema de carga e descarga tendo em consideração os parâmetros da Tabela 4.2e da Tabela 4.5.

4.2.1 Comportamento do SOC

O comportamento do SOC é apresentado na Figura 4.10.

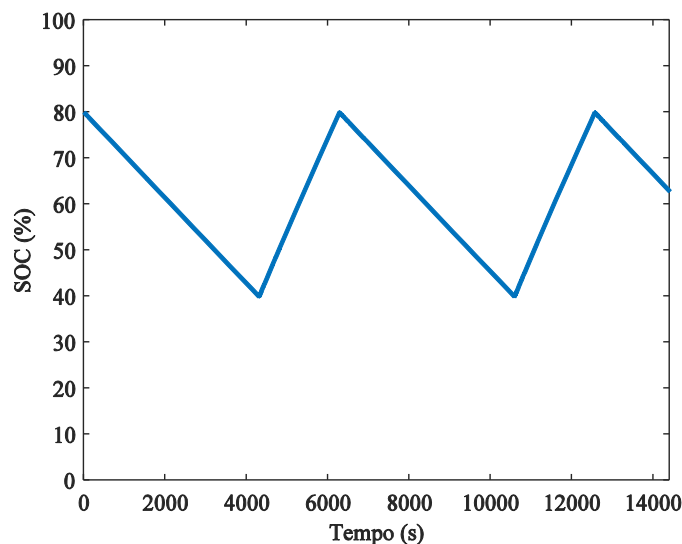


Figura 4.10-Comportamento do SOC.

Esta simulação apresenta a evolução do SOC compreendido entre 80% e 40%, num horizonte temporal de 14400 s, i.e., 4 h. Durante os 4301 s iniciais (≈ 1 h 12 m) a bateria descarrega de uma forma constante até o valor de SOC alcançar os 40%. A partir daí inicia o processo de carga de uma forma também constante até a bateria atingir o valor do SOC de 80%, durante 1977 s, i.e., entre o intervalo de tempo de 4301 s e 6278 s, i.e., ≈ 33 min.

4.2.2 Tensão na Bateria 1

O comportamento da tensão é apresentado na Figura 4.11.

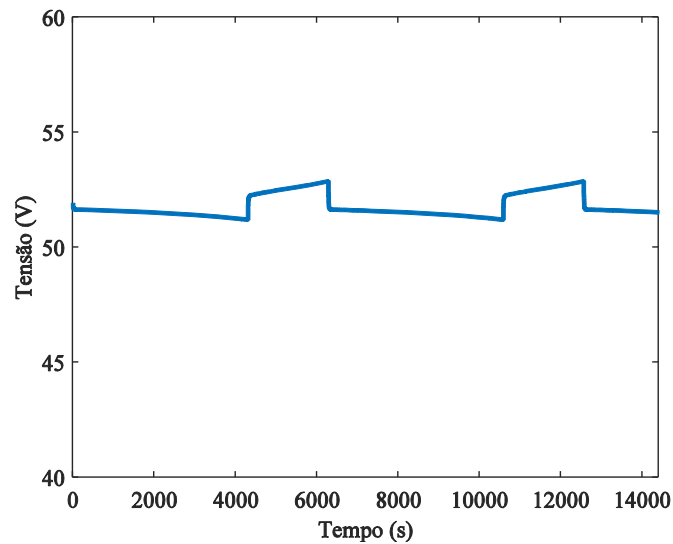


Figura 4.11-Tensão na Bateria 1.

Nesta simulação foi considerada a tensão da Bateria 1 no valor de 48 V. A tensão de alimentação, i.e., fonte de tensão, aos terminais da Bateria 1 durante o processo de carga no valor de 60 V. Nos instantes iniciais até aos 4301 s, período em que a bateria se encontra em regime de descarga, o valor de tensão varia entre o valor de 51,65 V e o valor de 51,20 V sendo o comportamento de descarga ligeiramente curvilíneo de concavidade voltada para cima. No processo de carga o valor de tensão varia de forma exponencial dos 51,80 V aos 54,60 V no intervalo de tempo entre 4301 s e 6278 s, i.e., ≈ 33 min.

4.2.3 Corrente na Bateria 1

O comportamento da corrente na bateria 1 é apresentado na Figura 4.12:

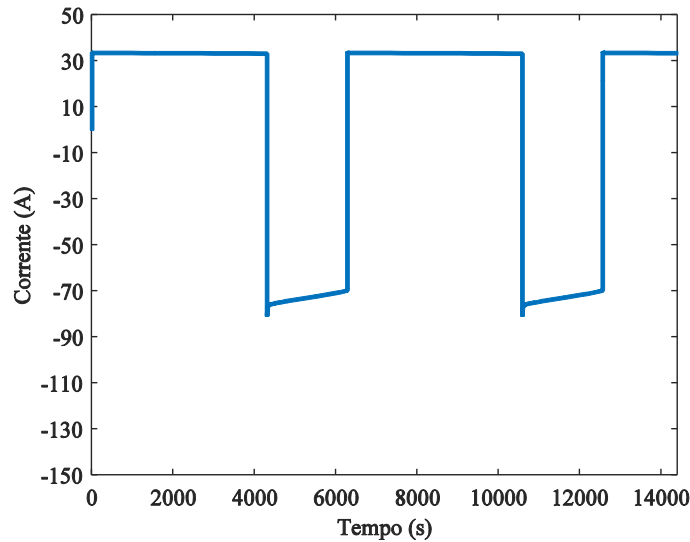


Figura 4.12-Corrente na Bateria 1.

Na avaliação do comportamento de descarga da bateria, é verificado que o comportamento da corrente, é praticamente constante com um valor de 33,5 A, durante os 4301 s iniciais (1,20h). Tendo a Bateria 1 uma de capacidade máxima de 100 Ah (Tabela 4.2) sendo percebido através da Figura 4.10 que o intervalo de capacidade estudado, varia entre:

$$Capacidade\ Bateria\ 1_{80\%} = 100 \cdot 0,8 = 80\ Ah \quad (4.4)$$

$$Capacidade\ Bateria\ 1_{40\%} = 100 \cdot 0,4 = 40\ Ah \quad (4.5)$$

$$[80\ Ah; 40\ Ah]$$

Visto a diferença entre o intervalo de estudo ser 40 Ah,

(4.6)

$$\text{Corrente na Bateria 1} = \frac{40 \text{ Ah}}{1,20 \text{ h}} = 33,33 \text{ A}$$

Conseguimos assim comprovar o valor aproximado de corrente através dos cálculos, de 33,33 A e comparar com o valor retirado a partir da Figura 4.12 de 33,5 A. Entre 4301 s e 6278 s apresenta um crescimento exponencial negativo dos -80 A a -70 A. O valor negativo de corrente está associado ao facto de a Bateria se encontrar a absorver energia.

4.2.4 Zona Exponencial

A correlação existente entre a Tensão e o SOC na bateria 1 permite comprovar a histerese é apresentado na Figura 4.13.

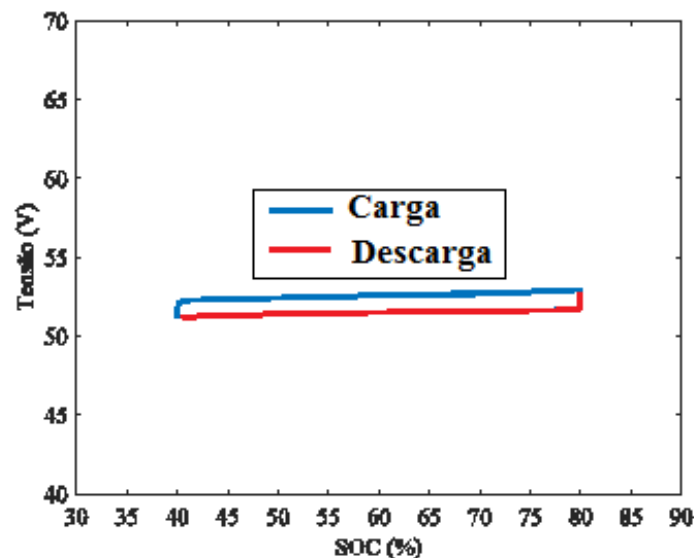


Figura 4.13- Histerese.

A zona exponencial, Exp (s), representa a histerese durante os ciclos de carga e descarga, respetivamente a azul e a vermelho. No ciclo de carga é verificado a variação do SOC entre os 40% e os 80%, com o valor de tensão a oscilar exponencialmente entre 51,80 V e 54,60 V. Os aumentos de tensão exponenciais quando a bateria está a ser carregada, não está interligado diretamente com o SOC da

bateria. Quando a bateria está a descarregar, a tensão diminui imediatamente com um comportamento exponencial entre os 51,65 V e os 51,20 V.

4.2.5 Características de Descarga

O comportamento genérico durante a descarga é apresentado na Figura 4.14.

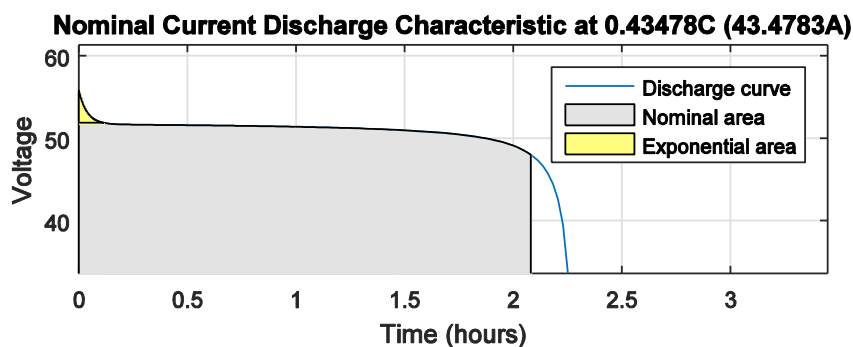


Figura 4.14-Curva de descarga à corrente nominal.

A curva de descarga é simulada com uma corrente nominal de 43,48 A, num ciclo completo de descarga da bateria dos 100% SOC a 0% SOC. A duração do tempo de descarga é de 2 h e 15 min. A área exponencial é iniciada com um valor de tensão de 54,92 V e termina com o valor de tensão 51,22 V durante aproximadamente 13 min. A área nominal termina em 48,33 V, i.e., $t = 2$ h e 6 min.

Os resultados da simulação apresentados na Figura 4.8, na Figura 4.9, na Figura 4.10, na Figura 4.11, na Figura 4.12, na Figura 4.13 e na Figura 4.14 permitem concluir que a bateria apresenta um comportamento coerente com o que os estudos teóricos e o conhecimento do comportamento da bateria levavam a prever.

4.2.6 Comportamento da Tensão na Carga DC

O comportamento da tensão na carga DC é apresentado na Figura 4.15.

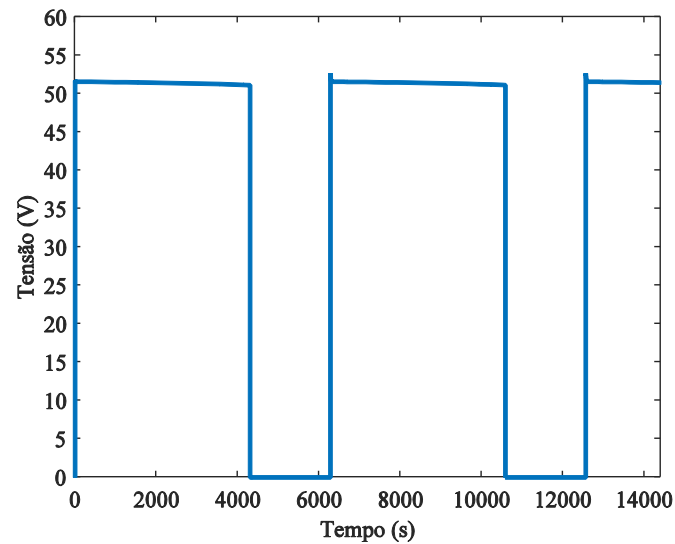


Figura 4.15-Tensão na Carga DC.

A tensão imposta aos terminais da carga DC, no período em que a carga DC está ligada, tem um valor inicial de 51,6 V e vai decrescendo até alcançar o valor de 51,15 V, i.e., um decréscimo inferior a 1% até ao instante $t=4301$ s. A partir do instante $t=4301$ s a carga DC é desligada até $t=6278$ s, passando a tensão aos terminais da carga a ter um valor de 0 V, i.e., o período em que a bateria está carregar.

4.2.7 Comportamento da corrente na Carga DC

O comportamento da corrente na carga DC é apresentado na Figura 4.16.

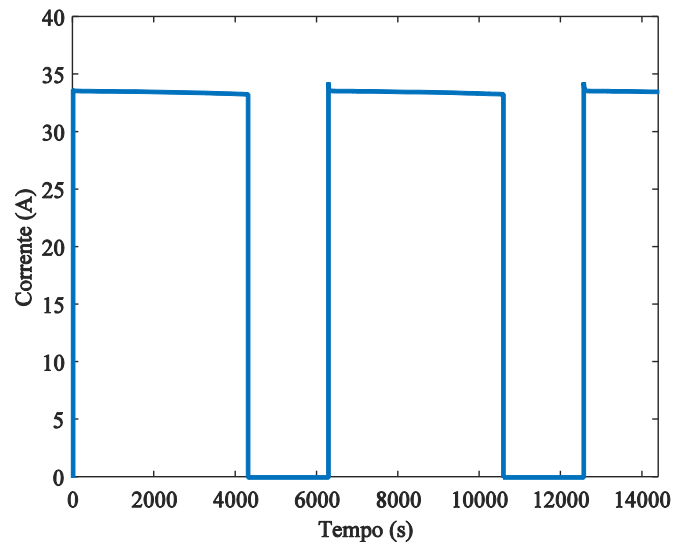


Figura 4.16-Corrente na carga DC.

Da análise à corrente absorvida pela Carga DC, é verificado que no período em que a Carga DC está ligada, a corrente inicial tem o valor de 33,6 A e vai decrescendo até alcançar o valor de 33,3 A, i.e., um decréscimo de 1% até ao instante $t=4301$ s. A partir do instante $t=4301$ s a Carga DC é desligada até $t=6278$ s sendo o seu valor de corrente 0 A.

4.2.8 Potência da Carga DC

A potência na carga DC é apresentada na Figura 4.17.

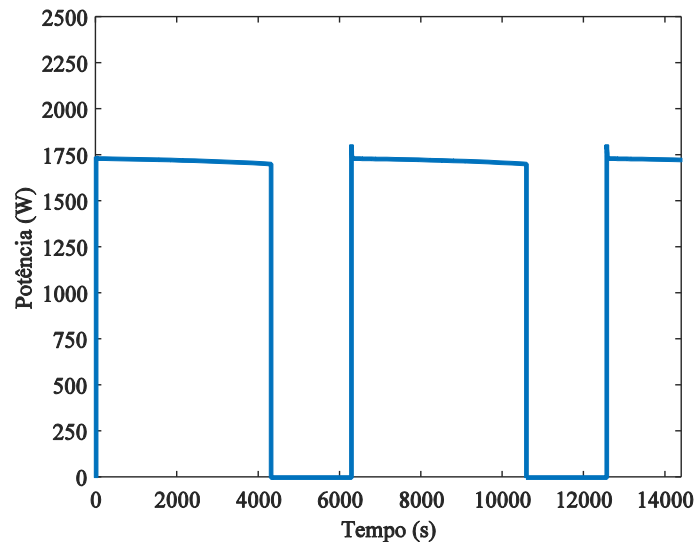


Figura 4.17-Potência na Carga DC.

O comportamento da potência absorvida pela carga DC está diretamente relacionada com a tensão e corrente apresentado na Figura 4.15 e na Figura 4.16. No instante inicial $t_0 = 0 \text{ s}$ a potência tem o valor de 1734 W e no instante final $t_{final} = 4301 \text{ s}$ a potência tem o valor de 1703 W .

4.3 Simulação 3 – Bateria de Níquel Cádmio

A simulação computacional apresenta o comportamento do sistema de carga e descarga tendo em consideração os parâmetros apresentados na Tabela 4.3, e na Tabela 4.5.

4.3.1 Comportamento do SOC

O comportamento do SOC é apresentado na Figura 4.18.

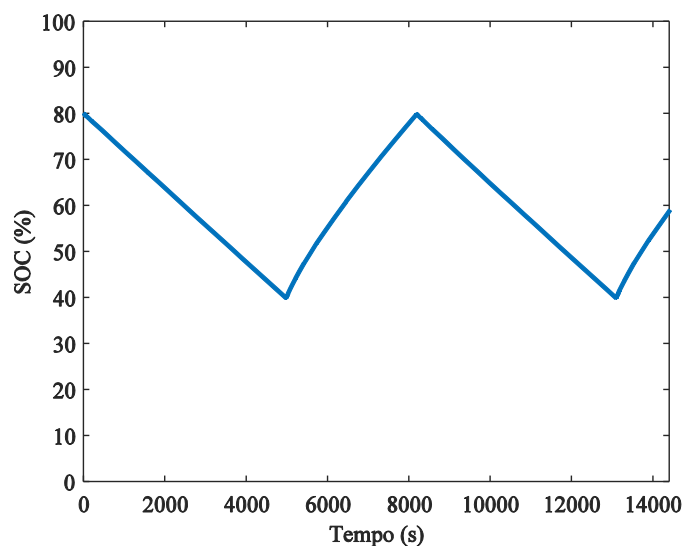


Figura 4.18-Comportamento do SOC.

Nesta simulação foi efetuada para uma variação de SOC compreendido entre 80% e 40%, num horizonte temporal de 14400 s, i.e., 4 h. Durante os primeiros 4963 s (≈ 1 h 23 min) a bateria descarrega de uma forma constante até o valor de SOC alcançar os 40%. A partir daí inicia o processo de carga de uma forma constante até a bateria atingir o valor de SOC de 80%, durante 3212 s, i.e., entre o intervalo de tempo de, 4963 s e de 8175 s, i.e., ≈ 54 min.

4.3.2 Tensão na Bateria 1

O comportamento da tensão é apresentado na Figura 4.19.

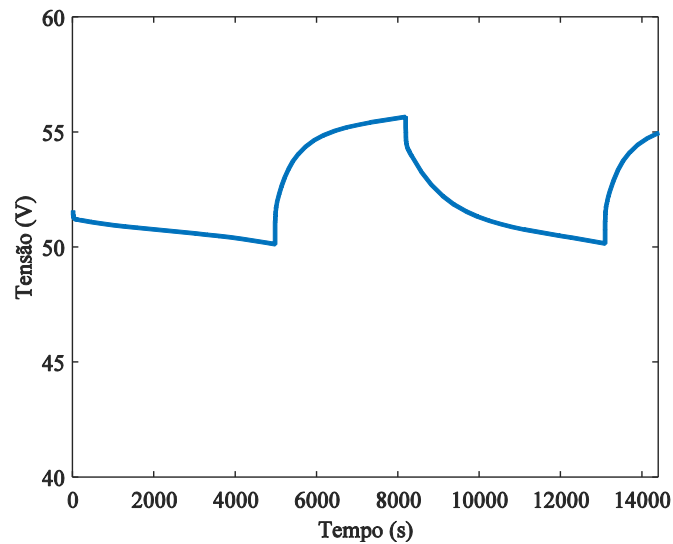


Figura 4.19-Tensão na Bateria 1.

Nesta simulação foi considerada a tensão da Bateria 1 no valor de 48 V. A tensão de alimentação, i.e., fonte de tensão aos terminais da Bateria 1 durante o processo de carga no valor de 60 V. Nos instantes iniciais até aos 4963 s, período em que a bateria se encontra em regime de descarga, o valor de tensão varia entre 51,30 V e o valor de 50,15 V sendo o comportamento de descarga ligeiramente curvilíneo de concavidade voltada para cima. No processo de carga o valor de tensão varia de forma exponencial entre o valor de 50,80 V e o valor de 55,70 V no intervalo de tempo de 4963 s e 8175 s, i.e., ≈ 54 min.

4.3.3 Corrente na Bateria 1

O comportamento da corrente na bateria 1 é apresentado na Figura 4.20:

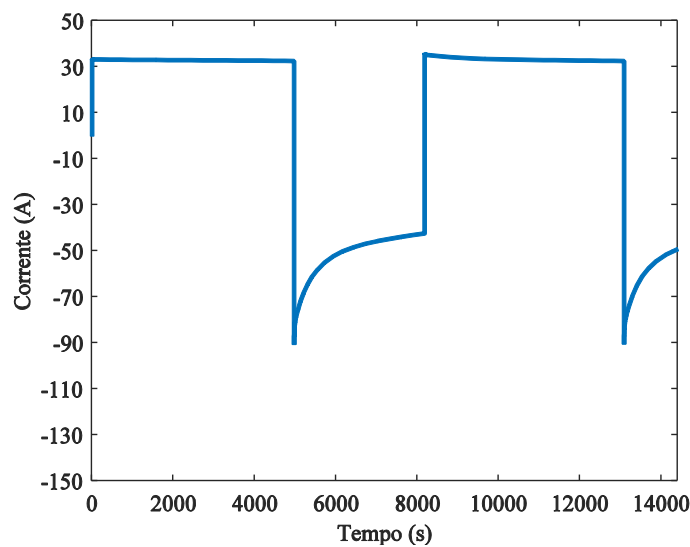


Figura 4.20-Corrente na Bateria 1.

Na análise ao processo de descarga da bateria, é verificado que o comportamento da corrente, é praticamente constante com um valor de 33 A, durante os 4963 s iniciais, i.e., 1,38 h. Tendo a Bateria 1 uma de capacidade máxima de 113,64 Ah (Tabela 4.3) é percebido através da Figura 4.18 que o intervalo de capacidade estudado, varia entre:

$$\text{Capacidade Bateria } 1_{80\%} = 113,64 \cdot 0,8 = 90,91 \text{ Ah} \quad (4.7)$$

$$\text{Capacidade Bateria } 1_{40\%} = 113,64 \cdot 0,4 = 45,46 \text{ Ah} \quad (4.8)$$

$$[90,91 \text{ Ah}; 45,46 \text{ Ah}]$$

Visto a diferença entre o intervalo de estudo ser 45,45 Ah,

$$\text{Corrente na Bateria 1} = \frac{45,45 \text{ Ah}}{1,38 \text{ h}} = 32,9 \text{ A} \quad (4.9)$$

Conseguimos assim comprovar o valor aproximado de corrente através dos cálculos, de 32,9 A e comparar com o valor retirado a partir da Figura 4.20 de 33 A. Entre [4963 s;8175 s] apresenta um crescimento exponencial negativo dos -91 A a -42 A. O valor negativo de corrente está associado ao facto de a Bateria se encontrar a absorver energia.

4.3.4 Zona Exponencial

A correlação existente entre a Tensão e o SOC permite comprovar a histerese na bateria como é apresentado na Figura 4.21.

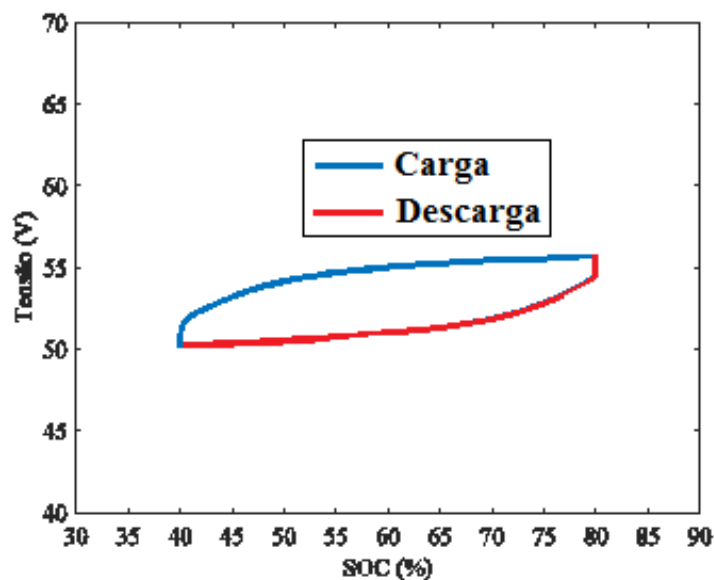


Figura 4.21-Histerese.

A zona exponencial Exp (s) representa a histerese durante os ciclos de carga e descarga, respetivamente a azul e a vermelho. No ciclo de carga é verificado a variação do SOC entre os 40% e os 80%, com o valor de tensão a oscilar exponencialmente entre 50,80 V e 55,70 V. Os aumentos de tensão exponenciais quando a bateria está a ser carregada, não está interligado diretamente com o SOC da bateria. Quando a bateria está a descarregar, a tensão diminui imediatamente com um comportamento exponencial entre os 51,30 V e os 50,15 V.

4.3.5 Características de Descarga

O comportamento genérico de descarga analisado no modelo em estudo é apresentado na Figura 4.22.

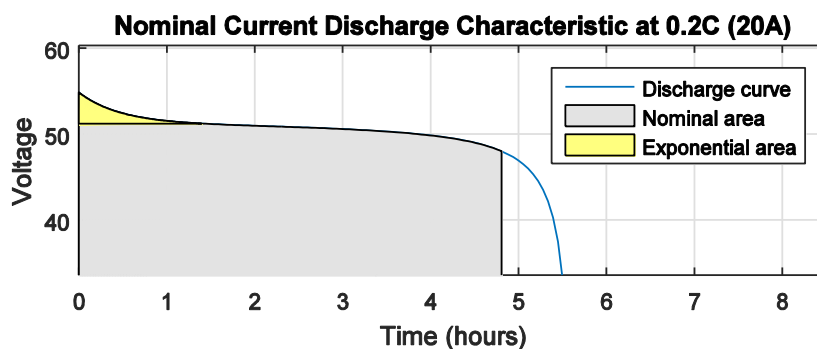


Figura 4.22-Curva de descarga à corrente nominal.

A curva de descarga é simulada à corrente nominal de 20 A, num ciclo completo de descarga da bateria dos 100% SOC a 0% SOC, tendo uma duração de 5 h e 28 min. A área exponencial é iniciada em 54,92 V e termina em 51,22 V durante aproximadamente 1 h 20 min. A área nominal termina em 48,3 V às 4 h e 46 min.

Os resultados da simulação apresentados na Figura 4.18, na Figura 4.19, na Figura 4.20, na Figura 4.21 e na Figura 4.22, permitem concluir que a bateria apresenta um comportamento coerente com o que os estudos teóricos e o conhecimento do comportamento da bateria levavam a prever.

4.3.6 Comportamento da Tensão na Carga DC

O comportamento da tensão na Carga DC é apresentado na Figura 4.23.

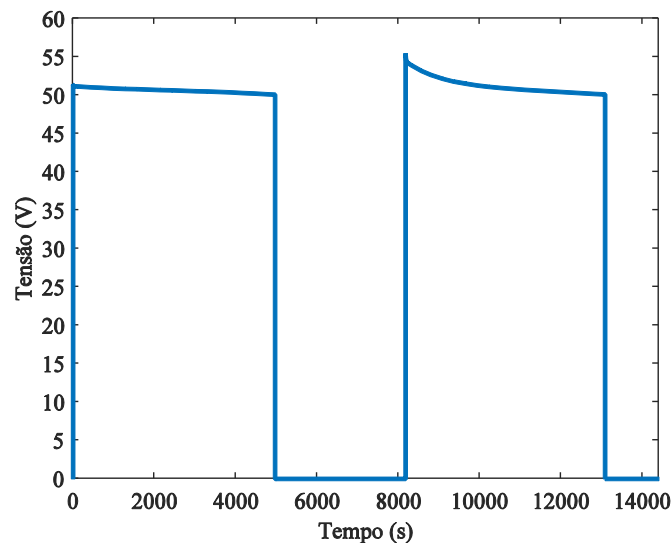


Figura 4.23- Comportamento da tensão na carga DC.

Da análise à tensão imposta aos terminais da Carga DC, é verificado que no período em que a Carga DC está ligada, a tensão inicial tem o valor de 51,20 V e vai decrescendo até alcançar o valor de 50,10 V, i.e., um decréscimo de 2% até ao instante $t=4963$ s.

A partir do instante $t=4963$ s a Carga DC é desligada até $t=8175$ s, passando o valor da tensão aos terminais da carga a ser de 0 V. No segundo período, em que a carga se encontra ligada é verificado um valor de tensão superior ao primeiro período sendo que em $t=8175$ s o valor de tensão é de 55,50 V e vai decrescendo até 50,10 V em $t=13077$ s, i.e., um decréscimo de 10%.

4.3.7 Comportamento da corrente na Carga DC

A comportamento da corrente na carga DC é apresentada na Figura 4.24.

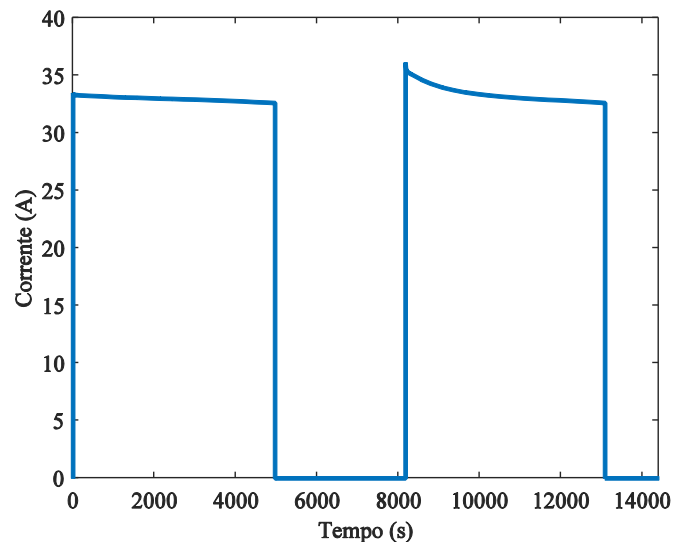


Figura 4.24-Corrente na carga DC.

Da análise do comportamento à corrente absorvida pela carga DC, é verificado que no período em que a carga DC está ligada, a corrente inicial tem o valor de 33,3 A e vai decrescendo até alcançar o valor de 32,6 A, i.e., um decréscimo de 2% até ao instante $t=4963$ s. A partir do instante $t=4963$ s a Carga DC é desligada até $t=8175$ s passando o valor de corrente na carga a ser de 0 A. No segundo período, em que a carga se encontra ligada é verificado um valor de corrente superior ao primeiro período sendo que em $t=8175$ s o valor de tensão é de 36,1 V e vai decrescendo até 32,6 V em $t=13077$ s, i.e., um decréscimo de 10%.

4.3.8 Potência da Carga DC

O comportamento da potência na carga DC é apresentado na Figura 4.25.

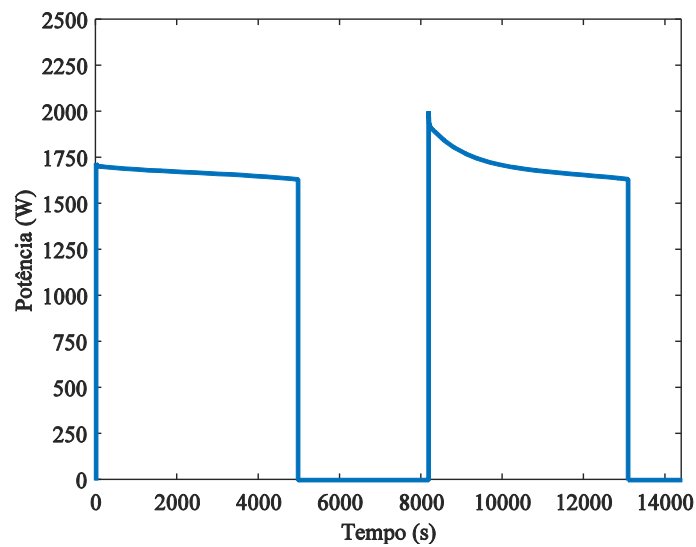


Figura 4.25-Potência na carga DC.

O comportamento da potência absorvida pela carga DC está diretamente relacionada com a tensão e corrente apresentado na Figura 4.23 e na Figura 4.24. No instante inicial $t_0 = 0 \text{ s}$ a potência tem o valor de 1695 W e no instante final $t_{final} = 48901 \text{ s}$ a potência tem o valor de 1633 W . No segundo período $t = 8175 \text{ s}$ a potência tem o valor 2004 W e para $t = 13077 \text{ s}$ a potência tem o valor de 1633 W .

4.4 Simulação 4 – Bateria de Hidretos Metálicos de Níquel

A simulação computacional apresenta o comportamento do sistema de carga e descarga tendo em consideração os parâmetros apresentados na Tabela 4.4 e na Tabela 4.5.

4.4.1 Comportamento do SOC

O comportamento do SOC é apresentado na Figura 4.26.

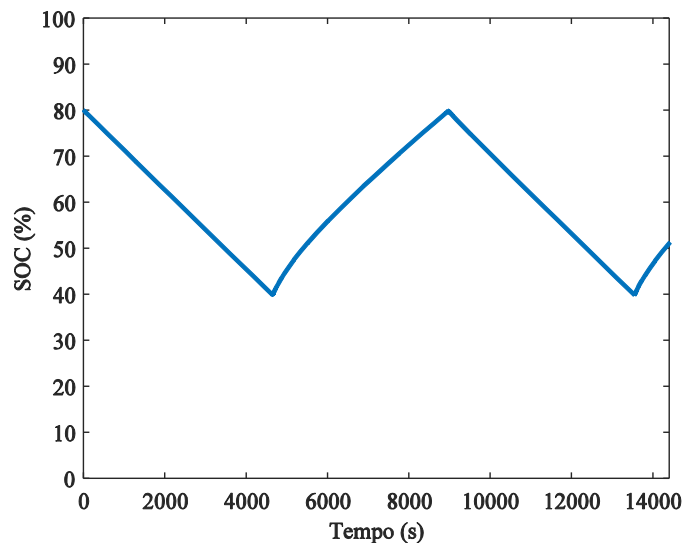


Figura 4.26-Comportamento do SOC.

Esta simulação apresenta a evolução do SOC variando entre 80% e 40%, num horizonte temporal de 14400 s, i.e., 4 h. Durante os 4633 s iniciais (≈ 1 h 17 min) a bateria descarrega de uma forma constante até o valor de SOC alcançar os 40%. A partir daí inicia o processo de carga de uma forma constante até a bateria atingir o valor do SOC de 80%, durante 4319 s, i.e., entre o intervalo de tempo de, 4633 s e 8952 s, i.e., ≈ 1 h 12 min.

4.4.2 Tensão na Bateria 1

O comportamento da tensão é apresentado na Figura 4.27.

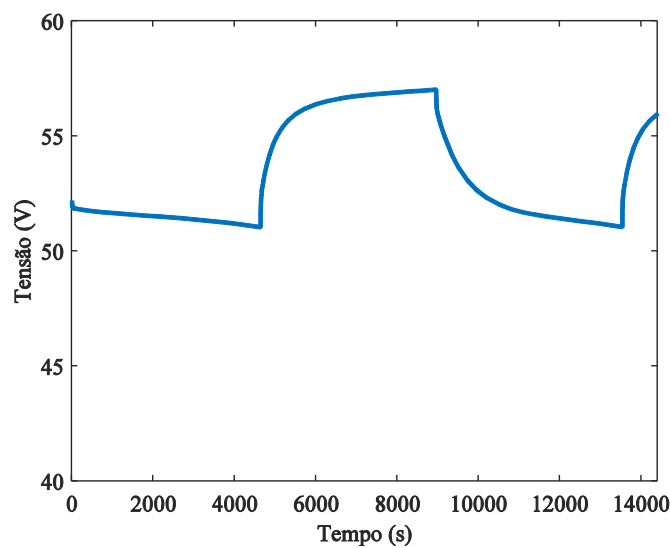


Figura 4.27-Comportamento da tensão bateria 1.

Nesta simulação foi considerada a tensão da bateria 1 no valor de 48 V. A tensão de alimentação i.e., fonte de tensão aos terminais da bateria 1 durante o processo de carga no valor de 60 V. Nos instantes iniciais até aos 4633 s, período em que a bateria se encontra em regime de descarga, o valor de tensão varia entre o valor de 52 V e o valor de 51 V sendo o comportamento de descarga ligeiramente curvilíneo de concavidade voltada para cima. No processo de carga o valor de tensão varia de forma exponencial dos 51,60 V aos 57 V no intervalo de tempo entre 4633 s e 8952 s, i.e., ≈ 1 h 12 min.

4.4.3 Corrente na Bateria 1

O comportamento da corrente na bateria 1 é apresentado na Figura 4.28.

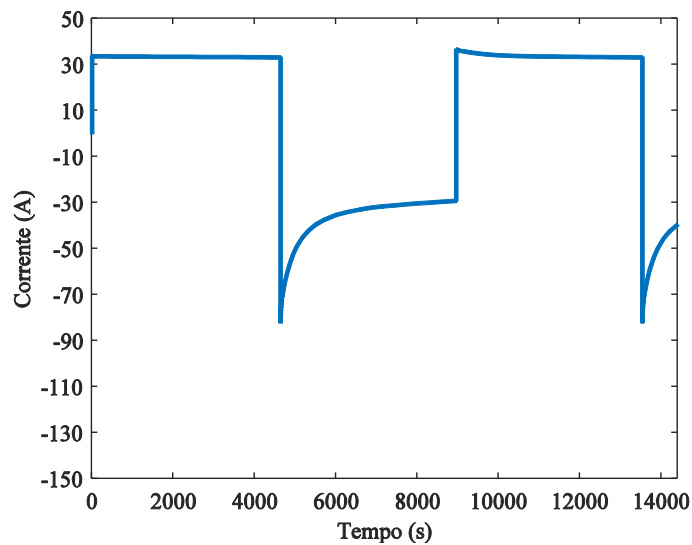


Figura 4.28-Corrente na Bateria 1.

Na análise ao processo de descarga da bateria, é verificado que o comportamento da corrente, é praticamente constante com um valor de 33,5 A, durante os 4633 s iniciais, i.e., 1,29 h. Tendo a bateria 1 uma capacidade máxima de 107,69 Ah (Tabela 4.4) é percebido através da Figura 4.26 que o intervalo de capacidade estudado, varia entre:

$$\text{Capacidade Bateria } 1_{80\%} = 107,69 \cdot 0,8 = 86,15 \text{ Ah} \quad (4.10)$$

$$\text{Capacidade Bateria } 1_{40\%} = 107,69 \cdot 0,4 = 43,08 \text{ Ah} \quad (4.11)$$

$$[86,15 \text{ Ah}; 43,08 \text{ Ah}]$$

Visto a diferença entre o intervalo de estudo ser 43,07 Ah,

$$\text{Corrente na Bateria 1} = \frac{43,07 \text{ Ah}}{1,29 \text{ h}} = 33,39 \text{ A} \quad (4.12)$$

Conseguimos assim comprovar o valor aproximado de corrente através dos cálculos, de 33,39 A e comparar com o valor retirado a partir da Figura 4.28 de 33,5 A. Entre [4633 s;8952 s] apresenta um crescimento exponencial negativo dos -82 A a -29 A. O valor negativo de corrente está associado ao facto de a Bateria se encontrar a absorver energia.

4.4.4 Zona Exponencial

A correlação existente entre a Tensão e o SOC permite comprovar a histerese na bateria como apresentado na Figura 4.29.

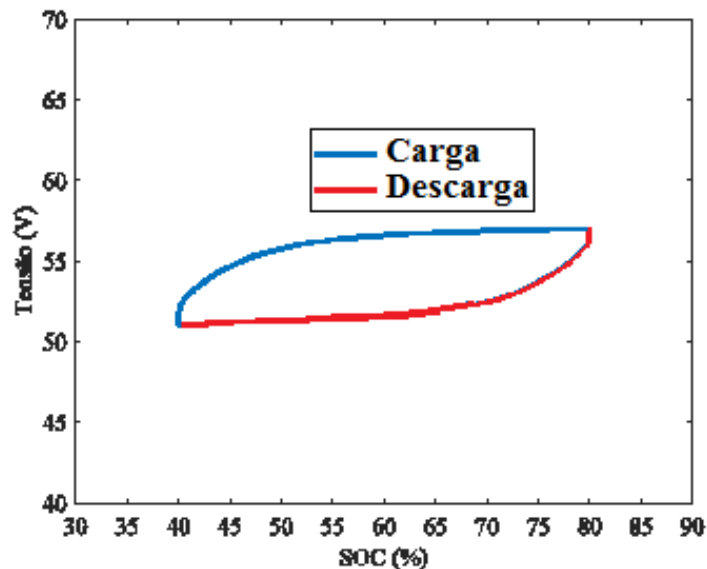


Figura 4.29-Histerese.

A zona exponencial Exp (s) representa a histerese durante os ciclos de carga e descarga, respetivamente a azul e a vermelho. No ciclo de carga é verificado a variação do SOC entre os 40% e os 80%, com o valor de tensão a oscilar exponencialmente entre 51,60 V e 57 V. Os aumentos de tensão exponenciais quando a bateria está a ser carregada, não está interligado diretamente com o SOC da bateria. Quando a bateria está a descarregar, a tensão diminui imediatamente com um comportamento exponencial entre os 52 V e os 51 V.

4.4.5 Características de Descarga

O comportamento genérico de descarga analisado no modelo em estudo é apresentado na Figura 4.30.

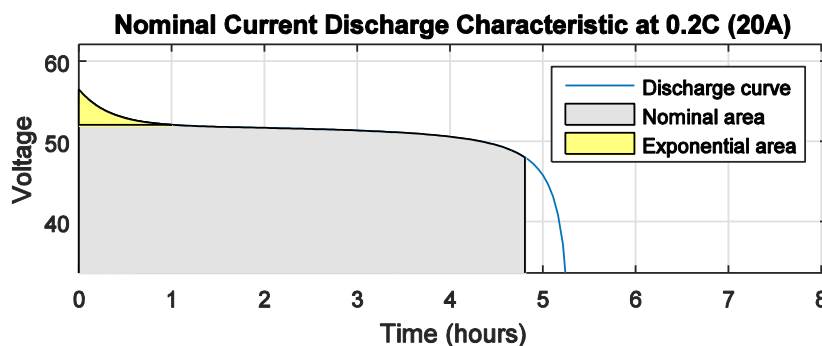


Figura 4.30-Curva de descarga à corrente nominal.

A curva de descarga é simulada à corrente nominal de 20 A, num ciclo completo de descarga da bateria dos 100% SOC a 0% SOC, tendo uma duração de 5 h e 19 min. A área exponencial é iniciada em 56,54 V e termina em 52,07 V durante aproximadamente 1 h. A área nominal termina em 47,50 V em 4 h e 46 min.

Os resultados da simulação apresentados na Figura 4.26, na Figura 4.27, na Figura 4.28, na Figura 4.29 e na Figura 4.30 permitem concluir que a bateria apresenta um comportamento coerente com o que os estudos teóricos e o conhecimento do comportamento da bateria levavam a prever.

4.4.6 Comportamento da Tensão na Carga DC

O comportamento da tensão na Carga DC é apresentada na Figura 4.31.

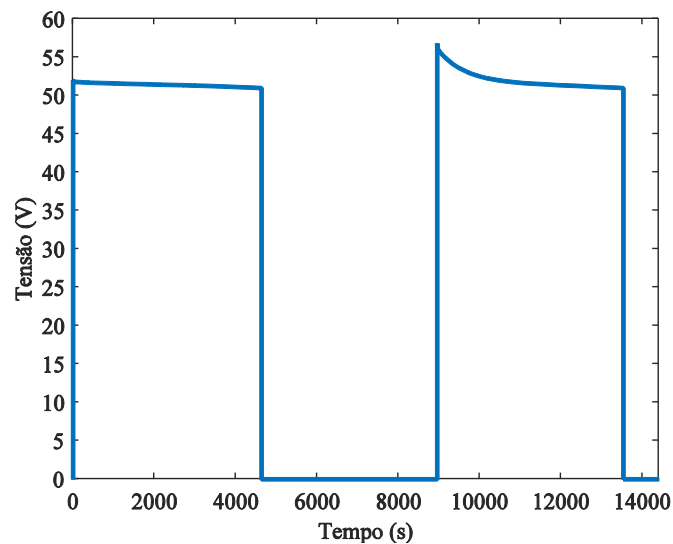


Figura 4.31-Tensão na Carga DC.

Da análise do comportamento da tensão imposta aos terminais da carga DC, é verificado que no período em que a carga DC está ligada, a tensão inicial tem o valor de 52 V e vai decrescendo até alcançar o valor de 51 V, ou seja um decréscimo de 2% até ao instante $t=4633$ s. A partir do instante $t=4633$ s a Carga DC é desligada até $t=8952$ s, passando o valor da tensão aos terminais da carga a ser de 0 V.

No segundo período, em que a carga se encontra ligada é verificado um valor de tensão superior ao primeiro período sendo que em $t=8952$ s o valor de tensão é de 56,78 V e vai decrescendo até 51 V em $t=13529$ s i.e., um decréscimo de 10%.

4.4.7 Comportamento da corrente na Carga DC

A análise da corrente na Carga DC é apresentada na Figura 4.32.

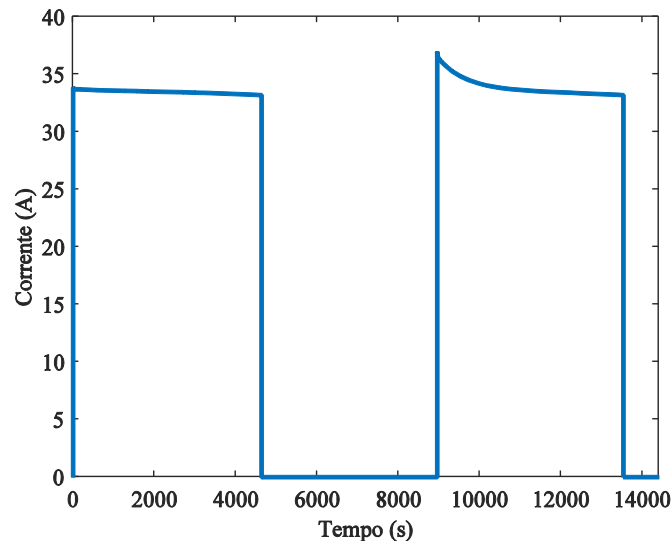


Figura 4.32-Corrente na Carga DC.

Da análise do comportamento à corrente absorvida pela carga DC, é verificado que no período em que a carga DC está ligada, a corrente inicial tem o valor de 33,72 A e vai decrescendo até alcançar o valor de 33,2 A, ou seja um decréscimo de 4,5% até ao instante $t=4633$ s. A partir do instante $t=4633$ s a Carga DC é desligada até $t=8952$ s passando o valor de corrente na carga a ser de 0 A. No segundo período, em que a carga se encontra ligada é verificado um valor de corrente superior ao primeiro período sendo que em $t=8952$ s o valor de tensão é de 36,1 A e vai decrescendo até 32,6 A em $t=13529$ s, i.e., um decréscimo de 10%.

4.4.8 Potência da Carga DC

O comportamento da potência na carga DC é apresentada na Figura 4.33.

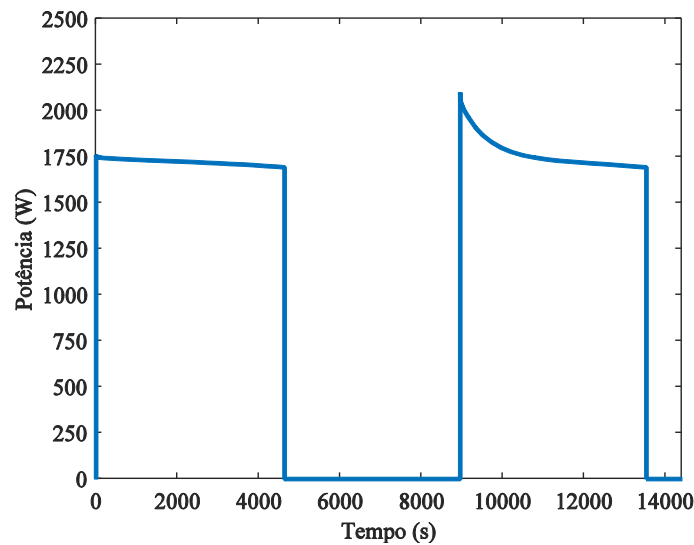


Figura 4.33-Potência na Carga DC.

O comportamento da potência absorvida pela carga DC está diretamente relacionada com a tensão e corrente apresentado na Figura 4.31 e na Figura 4.32. No instante inicial $t_0 = 0\text{ s}$ a potência tem o valor de 1753 W e no instante final $t_{final} = 4633\text{ s}$ a potência tem o valor de 1693 W . No segundo período $t = 8952\text{ s}$ a potência tem o valor 2050 W e para $t = 13529\text{ s}$ a potência tem o valor de 1633 W .

4.5 Conclusões

Face à procura energética atual, a escassez de combustíveis fósseis e a necessidade de redução da pegada de carbono resultaram numa nova consciência global sobre a importância da energia, da eficiência energética e da correta utilização da energia disponível. O armazenamento de energia em baterias é cada vez mais uma temática atual visto o número crescente de aplicações que necessitam de baterias tanto para o funcionamento autónomo como em sistemas integrados de redes de energia.

Ao longo desta dissertação, é evidente que existem diversas vantagens e desvantagens bem como parâmetros característicos nomeadamente desempenho, perfis de tensão e descarga, efeito de temperatura, taxa de retenção, ciclos de vida, características de descarga e custos que são importantes aquando da escolha de baterias para uma determinada aplicação. A comparação entre os resultados da simulação para as baterias em estudo são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6-Comparação de Resultados.

	Regime	Lead-Acid	Li-ion	NiCd	NiMH
SOC (40%<->80%) [t]	Descarga	1 h 22 min	1 h 12 min	1 h 23 min	1h17m
	Carga	39 min	33 min	54 min	1 h 12 min
Tensão na Bateria 1 [V]	Descarga	48-45,82	51,65-51,20	51,30-50,15	52-51
	Carga	48,87-54,60	51,80-54,60	50,80-55,70	51,60-57
Corrente na Bateria 1 [A]	Descarga	30	33	33	33
	Carga	[-130;-52]	[-80;-70]	[-91;-42]	[-82;-29]
Tensão na carga DC [V]	Descarga	48-45,82 (4,5%)	51,60-51,15 (1%)	51,20-50,10 (2%)	52-51 (2%)
Corrente na carga DC [A]	Descarga	31,2-29,8 (4,5%)	33,6-33,3 (1%)	33,3-32,6 (2%)	33,72-33,2 (4,5%)
Potência na carga DC [W]	Descarga	1498-1365	1734-1703	1695-1633	1753-1693

Da análise de resultados das simulações para as quatro tecnologias de baterias estudadas, é verificado que com o SOC a variar entre os 80% e 40%, a duração de um ciclo de descarga é superior na bateria de NiCd e menor na Li-íon, respetivamente 1h23m e 1h12m. Já a duração de um ciclo de carga na bateria de Li-ion demora 33m enquanto a bateria de NiMH, demora 1h17m.

A tensão na bateria 1 apesar de ser definida aquando a simulação em 48 V, esse valor nem sempre se consegue fazer cumprir, visto os valores de tensões das células serem diferentes, dependendo da tecnologia da bateria em estudo, Tabela 2.5. Durante o ciclo de descarga e carga é verificado que a tecnologia que apresenta maior oscilação de tensão é a de Chumbo-ácido e a de menor oscilação é a Li-íon.

A corrente na Bateria 1 durante o ciclo de descarga apresenta valores entre 30 A a 33 A. Entre as transições dos ciclos de descarga e carga são verificado picos de corrente, dando origem a oscilações acentuadas na corrente, sendo esses valores de maior relevância nas baterias de Chumbo-ácido com 78 A.

Da análise de resultados à tensão na carga DC é constatado que as oscilações nos valores de tensão têm um máximo de 4,5% na bateria de Chumbo-ácido e um mínimo de 1% nas baterias de Li-íon. A corrente na carga DC tem oscilações de 4,5% nas baterias de Chumbo-ácido e NiMH e de 1% Li-íon. Também a potência disponível à carga DC apresenta oscilações como seria de esperar, sendo a maior oscilação a partir da bateria de Chumbo-ácido.

Existem algumas suposições neste modelo como a resistência interna ser suposta constante durante os ciclos de carga e descarga, os parâmetros do modelo são deduzidos a partir de características de descarga e é assumido o mesmo para a carga, a temperatura não afeta o comportamento do modelo, a auto descarga da bateria não está representada e a bateria não tem efeito de memória.

Em desenvolvimentos futuros este modelo pode ser readaptado para uma interligação a uma rede de distribuição, reformular o método de carga da bateria visto o utilizado usar tensão contante, bem como a introdução de outros equipamentos como um inversor para a carga DC e um controlador de carga que permita uma dinâmica entre a energia da rede e a energia produzida através de energias renováveis.

Referências Bibliográficas

- [1] H. Butterworth, *Rechargeable Batteries Applications Handbook*, 1 st Editi. 1998.
- [2] M.Seixas,R.Melício, V.M.F. Mendes “Offshore wind energy system with DC transmission discrete mass: modeling and simulation,” *Electr. Power Components Syst.*, p. DOI:10.1080/15325008.2016.1219887, 2016.
- [3] M. H. Hasan, T. M. I. Mahlia, and H. Nur, “A review on energy scenario and sustainable energy in Indonesia,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 4, pp. 2316–2328, 2012.
- [4] E. W. Stein, “A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 640–654, 2013.
- [5] A. H. Arab and H. France, “Opti imal sizi ng of a stand-alo s one phot tovoltaic c system m with en nergy ma anageme ent in iso olated ar eas,” vol. 36, pp. 358–368, 2013.
- [6] G. Wetstone, K. Thornton, R. Hinrichs-rahlwes, S. Sawyer, M. Sander, R. Taylor, D. Rodgers, M. Alers, H. Lehmann, M. Eckhart, and D. Hales, *United Arab Emirates*. 2016.
- [7] U. S. E. I. Administration, “Annual Energy Outlook 2014,” 2014.
- [8] A. Lee, O. Zinaman, J. Logan, M. Bazilian, D. Arent, and R. L. Newmark, “Interactions , Complementarities,” 2012.
- [9] B. Cosi and G. Kraja, “A 100 % renewable energy system in the year 2050 : The case of Macedonia,” vol. 48, pp. 80–87, 2012.
- [10] G. Pleßmann, M. Erdmann, M. Hlusiak, and C. Breyer, “Global energy storage demand for a 100 % renewable electricity supply,” *Energy Procedia*, vol. 46, pp. 22–31, 2014.
- [11] N. S. Hasan, M. Yusri, S. Majid, and H. A. Rahman, “Review of storage schemes for wind energy systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 21, pp. 237–247, 2013.
- [12] Y. Li, H. Cao, S. Wang, Y. Jin, D. Li, X. Wang, and Y. Ding, “Load shifting of nuclear power plants using cryogenic energy storage technology,” *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1710–1716, 2014.

- [13] M. Z. Daud, A. Mohamed, and M. A. Hannan, “An improved control method of battery energy storage system for hourly dispatch of photovoltaic power sources,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 73, pp. 256–270, 2013.
- [14] W. H. Zhu, Y. Zhu, Z. Davis, and B. J. Tatarchuk, “Energy efficiency and capacity retention of Ni – MH batteries for storage applications,” *Appl. Energy*, vol. 106, pp. 307–313, 2013.
- [15] M. Ouyang, X. Feng, X. Han, L. Lu, Z. Li, and X. He, “A dynamic capacity degradation model and its applications considering varying load for a large format Li-ion battery,” *Appl. Energy*, vol. 165, pp. 48–59, 2016.
- [16] L. Schaefer, “Editorial,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 1, pp. 1–2, 2013.
- [17] M. C. Di Piazza, M. Pucci, and G. Vitale, “Intelligent power conversion system management for photovoltaic generation,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 2, no. 1, pp. 19–30, 2013.
- [18] R. P. Brooker, C. J. Bell, L. J. Bonville, H. R. Kunz, and J. M. Fenton, “Determining Vanadium Concentrations Using the UV-Vis Response Method,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 162, no. 4, pp. A608–A613, 2015.
- [19] M. Tadj, K. Benmouiza, and A. Cheknane, “Simulation Modelling Practice and Theory An innovative method based on satellite image analysis to check fault in a PV system lead – acid battery,” *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 47, pp. 236–247, 2014.
- [20] R. Dufo-lópez, J. M. Lujano-rojas, and J. L. Bernal-agustín, “Comparison of different lead – acid battery lifetime prediction models for use in simulation of stand-alone photovoltaic systems,” vol. 115, pp. 242–253, 2014.
- [21] B. Dawoud, E. Amer, and D. Gross, “Experimental investigation of an adsorptive thermal energy storage,” *Int. J. energy Res.*, vol. 31, no. August 2007, pp. 135–147, 2007.

- [22] I. González, A. Ramiro, M. Calderón, A. J. Calderón, and J. F. González, “Estimation of the state-of-charge of gel lead-acid batteries and application to the control of a stand-alone wind-solar test-bed with hydrogen support,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 15, pp. 11090–11103, 2012.
- [23] B. Turker, S. Arroyo Klein, L. Komsijska, J. J. Trujillo, L. Von Bremen, M. K??hn, and M. Busse, “Utilizing a vanadium redox flow battery to avoid wind power deviation penalties in an electricity market,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 76, pp. 1150–1157, 2013.
- [24] C. Blanc and A. Rufer, “Modeling of a vanadium redox flow battery electricity storage system,” *Lab. d’Electronique Ind.* , vol. PhD Thesis, p. 263, 2009.
- [25] M. Skyllas-Kazacos, M. H. Chakrabarti, S. a. Hajimolana, F. S. Mjalli, and M. Saleem, “Progress in Flow Battery Research and Development,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 158, no. 8, p. R55, 2011.
- [26] S. Corcuera and M. Skyllas-Kazacos, “State-of-Charge Monitoring and Electrolyte Rebalancing Methods for the Vanadium Redox Flow Battery,” *Eur. Chem. Bull.*, vol. 1, no. 12, pp. 511–519, 2012.
- [27] F. Rahman and M. Skyllas-Kazacos, “Vanadium redox battery: Positive half-cell electrolyte studies,” *J. Power Sources*, vol. 189, no. 2, pp. 1212–1219, 2009.
- [28] M. Bartolozzi, “Development of redox flow batteries. A historical bibliography,” *J. Power Sources*, vol. 27, no. 3, pp. 219–234, 1989.
- [29] J. Noack and A. Electrochemistry, “Redox Flow Energy Storage for Fluctuating Renewable Energies,” *Energy*, no. January, pp. 1–10, 2016.
- [30] Z. Yang, J. Zhang, M. C. W. Kintner-meyer, X. Lu, D. Choi, and J. P. Lemmon, “Electrochemical energy storage for green grid.pdf,” *Chem. Rev.*, pp. 3577–3613, 2011.
- [31] R. E. Ciez and J. F. Whitacre, “Comparative techno-economic analysis of hybrid micro-grid systems utilizing different battery types,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 112, pp. 435–444, 2016.

- [32] L. J. Ontiveros and P. E. Mercado, “Modeling of a Vanadium Redox Flow Battery for power system dynamic studies,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 16, pp. 8720–8727, 2014.
- [33] G. Merei, S. Adler, D. Magnor, M. Leuthold, and D. U. Sauer, “Multi-physics model for a vanadium redox flow battery,” *Energy Procedia*, vol. 46, pp. 194–203, 2014.
- [34] F. Baccino, M. Marinelli, P. Nørgård, and F. Silvestro, “Experimental testing procedures and dynamic model validation for vanadium redox flow battery storage system,” *J. Power Sources*, vol. 254, pp. 277–286, 2014.
- [35] C. Blanc and A. Rufer, “Understanding the Vanadium Redox Flow Batteries,” *Paths to Sustain. Energy*, pp. 333–358, 2010.
- [36] B. N. Arribas, R. Melicio, J. G. Teixeira, and V. M. F. Mendes, “Vanadium Redox Flow Battery Storage System Linked to the Electric Grid,” *Proc. Int. Conf. Renew. Energies Power Qual. - ICREPQ 2016*, pp. 1–6, Madrid, Spain, 04–06 May 2016.
- [37] D. Linden and T. B. Reddy, *HANDBOOK OF BATTERIES*. .
- [38] Wikipedia the free encyclopedia, “Rechargeable battery,” 2016. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Rechargeable_battery.
- [39] C. A. Vicent, *Modern Batteries- An Introduction to Electrochemical Power Sources*, Second Edi. ISBN: 0-7506-7092-4, 1997.
- [40] BatteryUniversity, “whats the best battery.” [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/archive/whats_the_best_battery.
- [41] M. Root, *The TABTM Battery Book an In-Depth Guide to Construction, Design, and Use*. The McGraw-Hill Companies, 2011.
- [42] “Electrónica-Associação de Baterias,” 2016. [Online]. Available: <http://www.electronica-pt.com/associacao-baterias>.
- [43] mpoweruk, “International Standards.” [Online]. Available: <http://www.mpoweruk.com/standards.htm>.
- [44] “mathworks.” [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html>.

- [45] O. Tremblay and L. A. Dessaint, “Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 3, no. 1, pp. 289–298, 2009.
- [46] H. He, R. Xiong, H. Guo, and S. Li, “Comparison study on the battery models used for the energy management of batteries in electric vehicles,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 64, pp. 113–121, 2012.

